

УДК 334.02:517 DOI: 10.14451/1.242.356

Применение цифровой графовой математической модели надежности опасных производственных объектов при реализации риск-ориентированного подхода в стратегическом управлении организацией*

© 2025 **Спешилова Наталья Викторовна**

Заведующий кафедрой экономической теории, региональной и отраслевой экономики, профессор, доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник. Оренбургский государственный университет, Оренбургский филиал Института экономики УрО РАН, Россия, Оренбург.

E-mail: spfenics@yandex.ru

© 2025 **Юдин Вадим Вильевич**

Магистрант кафедры экономической теории, региональной и отраслевой экономики, стратегическое планирование и управление на предприятии. Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург.

E-mail: Vadimka_rooney@mail.ru

Ключевые слова: промышленное предприятие, цифровизация, стратегическое управление, программный продукт, графовая математическая модель, метод Монте-Карло, риски.

Цель научного исследования – изучение возможностей применения математического инструментария при реализации стратегического управления на промышленных предприятиях. Рассмотрена возможность использования метода Монте-Карло в программных элементах специализированного цифрового продукта: модуле гидравлических расчетов и модуле стохастического моделирования газотранспортной системы. Отмечено, что подход можно использовать для прогнозирования вывода из эксплуатации участков газотранспортной системы вследствие возникновения аварийной ситуации; вынесения решения об административной приостановки деятельности до 90 суток со стороны контролирующих органов; запрета функционирования по результатам промышленной экспертизы. Кроме того, на этой основе можно определять первоочередные участки для выполнения капитальных ремонтов и включения в программы ремонтов/модернизации/реконструкции. По результатам построения модели и математического расчета, была определена приоритезация потребителей природного газа конкретного объекта исследования. При доработке модели с указанием величины суточного простоя потребителей рассчитаны не только вероятные

*Статья подготовлена в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России для ФГБУН «Институт экономики УрО РАН». (Р)

потери/ограничения в топливе, но и суммарная стоимость простоя оборудования и недополученной выгоды. Сделан вывод, что применение цифровой графовой математической модели надежности опасных производственных объектов позволяет повысить безопасность и надёжность газопроводов, снизить риски возникновения аварий и утечек, простоев оборудования, а также минимизировать непредвиденные затраты. Метод является важным инструментом в поддержке принятия управленческих решений, направленных на обеспечение жизнедеятельности организации.

Введение

Риск-ориентированный подход [4] в экономическом управлении предприятиями представляет собой стратегию, направленную на эффективное управление рисками, а также принятие обоснованных решений в различных аспектах экономической деятельности. Он играет ключевую роль в обеспечении стабильности и развития компаний, позволяя им минимизировать потери, принимать взвешенные решения, более качественно выстраивать систему планирования ремонтов на производстве и пр. В современном мире, где технологические инновации играют ключевую роль в развитии инфраструктуры, обеспечение безопасности и надёжности газопроводов становится важной задачей, для решения которой в отношении поиска приоритетных направлений можно применять широкий спектр методов. Так, в условиях цифровой экономики [12; 13] приобретают особую популярность подходы, связанные с формализацией процессов, в том числе с применением математического инструментария.

Математическое моделирование [11] – это метод исследования сложных систем и процессов с помощью математических моделей. Одним из наиболее популярных методов математического моделирования является метод Монте-Карло [6], который основан на использовании случайных чисел для решения сложных задач. Это статистический метод, связанный с вероятностными расчетами. Он основан на многократном повторении случайных испытаний и последующем анализе их результатов. Данный метод может быть адаптирован к решению задач, связанных

с оценкой вероятности отказов и прогнозированием состояния трубопроводных систем, что и предлагается реализовать в рамках представленного исследования, объектом в котором является газотранспортная организация (одна из типовых – название не приводится в силу конфиденциальности предоставляемой информации), обеспечивающая транспортировку природного газа от месторождений до потребителей (промышленных предприятий), без учета домовладений.

Материалы и методы

Анализ научной литературы показывает, что метод Монте-Карло находит применение в различных областях науки и техники, включая трубопроводный транспорт. В работах [1; 2] рассматривается использование данного метода для оценки надёжности и безопасности трубопроводных систем. Метод Монте-Карло [7] позволяет учитывать случайные факторы, влияющие на работу трубопровода, такие как износ, коррозия, механические повреждения и др. Расчёты, проведенные с использованием данного метода, определяют временной карман – на какой срок вероятнее всего отключится участок. В работе [10] метод Монте-Карло применяется для прогнозирования вероятности отказов трубопровода на основе анализа длинных рядов – исторических данных о его работе. Что касается риск-ориентированного подхода, он включает в себя:

1. анализ и идентификацию рисков. Предприятие проводит анализ возможных рисков, связанных с финансовыми операциями, инвестициями, производством и другими аспектами

- деятельности;
2. оценку вероятности и последствий рисков. Организация оценивает, насколько вероятны те или иные риски и какие последствия они могут иметь для бизнеса;
 3. разработку мер по снижению рисков. На основе анализа и оценки рисков предприятие разрабатывает меры по их снижению. Они могут быть направлены на улучшение системы управления рисками, снижение вероятности рисков или минимизацию их последствий;
 4. мониторинг и контроль рисков. Организация постоянно отслеживает ситуацию и корректирует меры по снижению рисков в зависимости от изменений во внешней и внутренней среде.

Основные направления риск-ориентированного подхода:

1. минимизация потерь: анализ и идентификация рисков позволяют предприятию минимизировать возможные потери и обеспечить финансовую стабильность;
2. принятие обоснованных решений: анализ рисков помогает предприятию принимать обоснованные решения, основанные на анализе возможных последствий;
3. повышение эффективности: риск-ориентированный подход способствует выявлению слабых мест в деятельности предприятия и принятию мер по их устранению;
4. соответствие законодательству: предприятия обязаны соблюдать требования законодательства, а риск-ориентированный подход помогает отслеживать соблюдение этих требований;
5. улучшение репутации: предприятия, демонстрирующие приверженность к системам управления рисками, вызывают доверие клиентов;
6. предотвращение кризисов: своевременное выявление и анализ рисков позволяют предотвратить кризисные ситуации, которые могут привести к значительным потерям;
7. адаптация к изменениям: внешняя среда постоянно изменяется, и предприятия должны

быть готовы к новым вызовам и возможностям. Риск-ориентированный подход помогает адаптироваться к происходящим изменениям и предугадывать дальнейшие последствия, что в свою очередь позволяет принимать обоснованные решения в изменяющихся условиях.

В контексте расчёта вероятности отказов трубопровода метод Монте-Карло может быть использован для моделирования случайных событий, влияющих на его работу, таких как износ, коррозия, механические повреждения и др. Для этого необходимо определить вероятности наступления этих событий и использовать метод Монте-Карло для генерации случайных чисел, соответствующих этим вероятностям.

На основе полученных случайных чисел можно рассчитать вероятность отказа трубопровода за определённый период времени. Для этого необходимо знать начальное состояние трубопровода, его характеристики и условия эксплуатации. Методика реализации метода Монте-Карло предполагает:

1. формулировку задачи;
2. построение математической модели (математическая модель – это система уравнений, которая описывает поведение системы или процесса);
3. генерацию случайных чисел, для чего используются специальные программы или библиотеки;
4. проведение испытаний;
5. анализ результатов (может включать в себя вычисление средних значений, дисперсии, корреляции и других характеристик).

Метод Монте-Карло имеет ряд преимуществ перед другими методами математического моделирования, в числе которых: универсальность – может использоваться для решения широкого круга задач из различных областей науки и техники; гибкость – позволяет легко изменять параметры модели и проводить различные испытания; точность – обеспечивает высокую точность результатов при правильном выборе

параметров модели. Однако несмотря на свои достоинства, метод имеет и некоторые недостатки [5]: сложность – может быть сложным для понимания и реализации, особенно для начинающих исследователей; затраты времени – может быть трудоемким по времени при большом количестве испытаний.

Метод Монте-Карло может быть использован для решения различных задач, связанных с оценкой вероятности отказов трубопровода, таких как:

- оценка вероятности отказов за определённый период времени;
- прогнозирование вероятности отказов на основе анализа исторических данных;
- определение необходимости проведения ремонтных работ на основе оценки остаточного ресурса трубопровода.

Для эффективного использования метода Монте-Карло при расчёте вероятности отказов трубопровода необходимо учитывать следующие рекомендации:

1. определить вероятности наступления случайных событий, влияющих на работу трубопровода;
2. собрать необходимые исходные данные о характеристиках трубопровода и условиях его эксплуатации;
3. выбрать подходящий алгоритм генерации случайных чисел;
4. проанализировать результаты расчётов и сделать выводы о вероятности отказов трубопровода.

Можно предложить использовать данный метод для оценки остаточного ресурса трубопровода и определения необходимости проведения ремонтных работ. В такой постановке необходимо ввести дополнительные условные коэффициенты вероятности административной приостановки участков. Рассмотрим применение этого метода для определения вероятности отказов участков газопровода, проанализируем его преимущества и ограничения, а также перспективы использования в инженерной практике.

Результаты и обсуждение

Опишем последовательность выполнения работ.

- I. Для разработки математической модели надежности газотранспортной системы использовано программное обеспечение almaGRID [3], которое предполагает реализацию гидравлических расчетов, снижения потребления и модуля стохастического моделирования.
- II. Гидравлический расчет подразумевает построение графа [9] и расчет параметров поток/давление на всех участках газотранспортной организации по предварительно заданным параметрам.
- III. Расчетное снижение потребления с установленными параметрами давления на участках сравнивается с введенными ограничениями по допустимому давлению. При наличии превышения производится снижение заданного потребления на газораспределительных станциях пропорционально выявленному значению.
- IV. Модуль стохастического моделирования реализуется методом Монте-Карло, при этом каждый такт моделирования принят равным 1-му календарному дню.
- V. На каждом такте, на основании данных о вероятностях выхода из строя или административной остановки каждого участка, находящегося в работе, проводится проверка возникновения ограничения транспортировки природного газа на нем. В случае последнего участок выводится из работы на определенное количество последующих тактов (при ограничении по вероятности поломки, при ограничении по вероятности административной приостановки).
- VI. Для каждого нового состояния газотранспортной системы производится расчет максимального допустимого потока газа с учетом установленных ограничений. Итогом расчета является получение следующих данных:
 - месторождений, с которых может осуществляться подача газа;

- объем газа, доступный от месторождений, рассчитанный с учетом установленных ограничений;
- потребители, которым возможна поставка газа;
- объем газа, доступный потребителям, рассчитанный с учетом установленных ограничений;
- длительность состояния (дни);
- перечень участков, остановленных в текущем состоянии.

Для каждого конечного потребителя производится вычисление порогового значения пропускной способности газотранспортной системы ниже которого (при снижении ее пропускной способности) данный потребитель будет отключен, либо его потребление газа будет снижено до минимально допустимого значения. После импорта результатов моделирования методом Монте-Карло для каждого потребителя производятся следующие расчеты. Подсчет количества состояний газотранспортной системы, при которых ее пропускная способность ниже порогового значения потребителя. Количество таких случаев определяет рассчитываемую вероятность ограничения потребителя. Эта величина подсчитывается для трех задаваемых сценариев общего потребления газа из газотранспортной системы – наибольшего, среднего, наименьшего. Для них по статистике газопотребления определяются их доли на протяжении года (так, по данным объекта исследования за 2023 г.: наименьший – 25%, средний – 50%, наибольший – 25%). Приведенная вероятность ограничения потребителя для всех сценариев равна сумме произведений (вероятность ограничения умноженная на долю сценария) для всех трех сценариев. Также, для каждого потребителя каждого сценария потребления все определенные вероятности распределяются по «карманам» длительности ограничения с шагом 10 дней (0–10, 10–20, ... 80–90 дней). По количеству ограничений каждого из диапазона длительностей рассчитывается вероятность той или иной длительности ограничения. Наиболее вероятная длительность ограничения рассчитывается как средневзвешенная для всех трех сценариев.

Для начала работы с моделью заполняются входные параметры состояния участков газотранспортной системы: объем добычи, потребления газа, длина участков, диаметр трубопровода, вероятность реализации риска по методике ВНИИСТ, состояния участков закрыт/открыт, допустимое значение давления по результатам экспертиз промышленной безопасности, вероятности приостановки деятельности (табл. 1, 2).

Следующим этапом выполняется гидравлический расчет с определением снижения потребления, на котором строится модель графа (рис. 1).

При выводе графа приняты следующие обозначения для участков:

- сплошная фиолетовая линия – участок в работе;
- сплошная черная линия – технический участок необходимый для корректной работы модели;
- красная пунктирная линия – участок закрыт по данным файла с исходным состоянием ГТС;
- фиолетовая пунктирная линия – участок закрыт по алгоритму модели, как связанный с одним из других закрытых участков.

Модуль стохастического моделирования используется как источник информации (рис. 2) для преобразования данных моделирования в метрики оценки рисков.

Из полученных данных по гидравлическому и стохастическому расчетам преобразуются итоговые значения по вероятности приостановки, очередности ограничений. Также можно дополнить стоимостью простоя/ограничения, сводки баланса добычи/расхода газа (рис. 3, 4). Часть информации на рисунках 3 и 4 не отображена в связи с ее конфиденциальностью.

Данные расчеты позволяют ранжировать потребителей по значимости, а также увидеть возможные потери в виде простоя по причине недополучения природного газа.

Для каждого потребителя вероятности распределяются по «карманам» длительности ограни-

Таблица 1. Характеристика добычи и расхода газа.

Источники	Производство газа, млн м ³ /сут.	Давление, кгс/м ²	Потребители	Потребление газа, млн м ³ /сут.
ГКМ-1	1,34	50	ГРС-1	6,95
ГКМ-2	0,31		ГРС-2	4,13
ГКМ-3	0,12		ГРС-4	0,2
			АГРС-1	0,76
ГКМ-4	13,89		ГРС-3	3,57
		АГРС-2	0,04	

Таблица 2. Характеристика участков газотранспортной системы.

№ участка	Наименование участка	Длина, км	Вероятность ВНИИСТ	Диаметр, мм	Вероятность приостановки деятельности	Состояние участка	Мах. давление, кгс/м ²
1	Участок 1	15,5	1,8	700	1,25	Открыт	48
2	Участок 2	10,5	0,5	700	1,25	Открыт	48
3	Участок 3	29,6	2	700	1,25	Открыт	48
4	Участок 4	16	0,3	700	1,25	Открыт	37
5	Участок 5	12,5	2,1	700	8,5	Открыт	37
6	Участок 6	45	1,2	700	8,5	Открыт	37
7	Участок 7	0,1	0,5	700	1,25	Открыт	43
8	Участок 8	1	0,3	700	1,25	Открыт	37
9	Участок 9	1	0,3	700	1,25	Открыт	43
10	Участок 10	11,4	0,5	700	1,25	Открыт	43

чения с шагом 10 дней (0–10, 10–20, ... 80–90 дней). Так, например, рассматривая потребителя № 7 (рис. 3), из полученных расчетов можно увидеть, что наиболее вероятным ограничением является приостановка эксплуатации сроком на 16,40 дней, а приведенная вероятность составляет 13,38%, при которой ожидаемые финансовые потери равны 109,50 млн \$.

Заключение

Результатом использования модели являются приоритезация участков и планирование текущих, а также капитальных ремонтов на основе актуальных данных о состоянии газотранспортной системы, в том числе вероятности и тяжести ограничений газоснабжения конечных

потребителей из-за инцидентов на газотранспортной системе. Однако следует учитывать, что применение математических моделей [8] требует определенных ресурсов и компетенций для их реализации. Необходимо тщательно продумать выбранные зависимости, ограничения, определить параметры и распределения, а также интерпретировать результаты. Тем не менее эти усилия оправдывают себя благодаря повышению качества стратегического управления и снижению рисков, а в последствие к грамотному распределению ресурсов для поддержания работоспособности оборудования. Все это позволит повысить безопасность и надёжность газопроводов, а также снизить вероятности возникновения аварий и утечек.

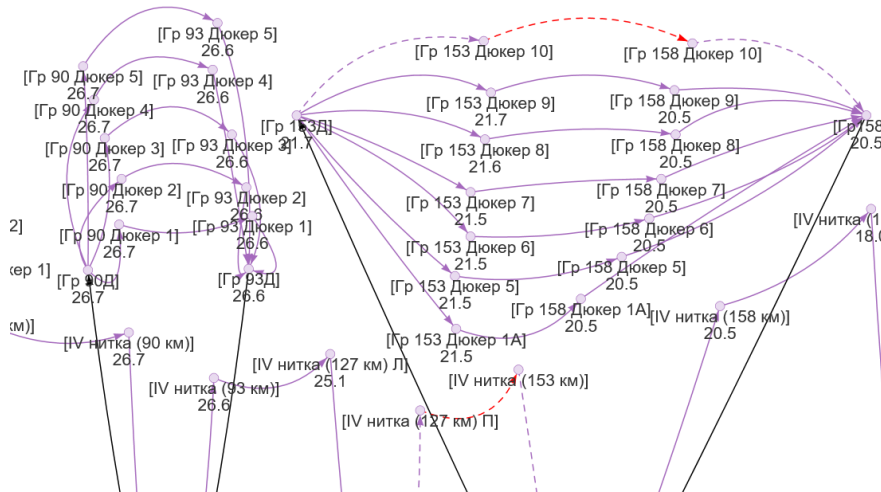


Рис. 1. Фрагмент модели графа гидравлического расчета.

1111	11,477	111111	11,477	82	7bc802d10b714d9986ec7b77414345c6;
1111	11,224	111111	11,224	8	7bc802d10b714d9986ec7b77414345c6; 8f81c8569f02423e870cf7363c338cd3;
1111	13,013	111111	13,013	33	8f81c8569f02423e870cf7363c338cd3;
1111	12,854	111111	12,854	49	8f81c8569f02423e870cf7363c338cd3; df6ab0de2bfe4a47ab112118945a5994;
1111	13,781	111111	13,781	41	df6ab0de2bfe4a47ab112118945a5994;
1111	13,917	111111	13,917	66	
1111	11,991	111111	11,991	87	56943f271f1544c8a311b637c1e6ded6;
1111	11,517	111111	11,517	3	56943f271f1544c8a311b637c1e6ded6; af69281cb5e947728471041b2e4d9d6d;
1111	13,071	111111	13,071	27	af69281cb5e947728471041b2e4d9d6d;
1111	12,450	111111	12,450	60	24b7c3825d4b403db7aca867bcdaaffd; af69281cb5e947728471041b2e4d9d6d;
1111	13,231	111111	13,231	30	24b7c3825d4b403db7aca867bcdaaffd;
1111	13,917	111111	13,917	9	
1111	13,124	111111	13,124	42	49d3c829a9c245c0b711108794b3c029;
1111	13,049	111111	13,049	48	49d3c829a9c245c0b711108794b3c029; a7b78c97113041a28cab7a3fcd261e33;
1111	13,848	111111	13,848	1	a7b78c97113041a28cab7a3fcd261e33;
1111	13,024	111111	13,024	41	a7b78c97113041a28cab7a3fcd261e33; c791882c4dd64d10a5bddcfe6ca16b7d;
1111	13,099	111111	13,099	1	c791882c4dd64d10a5bddcfe6ca16b7d;
1111	12,950	111111	12,950	48	c791882c4dd64d10a5bddcfe6ca16b7d; df6ab0de2bfe4a47ab112118945a5994;
1111	13,781	111111	13,781	9	df6ab0de2bfe4a47ab112118945a5994;
1111	11,900	111111	11,900	33	4667eb5846c74747bd0b0c24c859b5de; df6ab0de2bfe4a47ab112118945a5994;

Рис. 2. Фрагмент модуля стохастического расчета.

Приоритетность потребителя	Потребитель	Максимальное суточное потребление в 2023, млн.м3/сут	Доля потребителя в общем потреблении	Стоимость простоя, млн\$/сут	Вклад потребителей в отбор газа из ГТС	Приведенное к заданной сумме потребления, млн.м3/сут	Вклад потребителей в отбор газа из ГТС	Приведенное к заданной сумме потребления, млн.м3/сут	Вклад потребителей в отбор газа из ГТС	Приведенное к заданной сумме потребления, млн.м3/сут
1	Неснижаемые потребители	0,000	0,0%	0,000	0,883	0,000	0,883	0,000	0,883	0,000
2	Потребитель 1	0,062	0,5%	0,000	0,046	0,046	0,030	0,030	0,017	0,017
3	Потребитель 2	4,455	35,6%	0,000	3,277	3,277	2,185	2,185	1,236	1,236
4	Потребитель 3	3,516	28,1%	0,000	2,586	2,586	1,724	1,724	0,975	0,975
5	Потребитель 4	3,172	25,4%	0,000	2,333	2,333	1,556	1,556	0,880	0,880
6	Потребитель 5	0,750	0,0%	15,803	-0,034	0,552	-0,034	0,552	-0,034	0,552
7	Потребитель 6	1,061	0,0%	12,496	0,483	0,780	0,483	0,780	0,483	0,780
19	Потребитель 7	0,138	1,1%	6,7	0,101	0,101	0,068	0,068	0,038	0,038
18	Потребитель 8	0,074	0,6%	0,000	0,054	0,054	0,036	0,036	0,021	0,021
17	Потребитель 9	0,448	3,6%	12,1	0,329	0,329	0,220	0,220	0,124	0,124
16	Потребитель 10	0,012	0,1%	13,5	0,009	0,009	0,006	0,006	0,003	0,003
15	Потребитель 11	0,069	0,6%	18,7	0,051	0,051	0,034	0,034	0,019	0,019
14	Потребитель 12	0,078	0,6%	16,4	0,057	0,057	0,038	0,038	0,022	0,022
13	Потребитель 13	0,036	0,3%	1,2	0,027	0,027	0,018	0,018	0,010	0,010
12	Потребитель 14	0,187	1,5%	12,1	0,137	0,137	0,092	0,092	0,052	0,052
11	Потребитель 15	0,174	1,4%	16,4	0,128	0,128	0,086	0,086	0,048	0,048
10	Потребитель 16	0,007	0,1%	9,1	0,005	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002
9	Потребитель 17	0,070	0,6%	24	0,051	0,051	0,034	0,034	0,019	0,019
8	Потребитель 18	0,012	0,1%	0,000	0,009	0,009	0,006	0,006	0,003	0,003
20	Потребитель 19 (резерв)		0,0%		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		14,321								
		14,321	100,0%							
					10,534		7,467		4,802	
					наибольшее		среднее		наименьшее	

Рис. 3. Приоритезация потребителей природного газа.

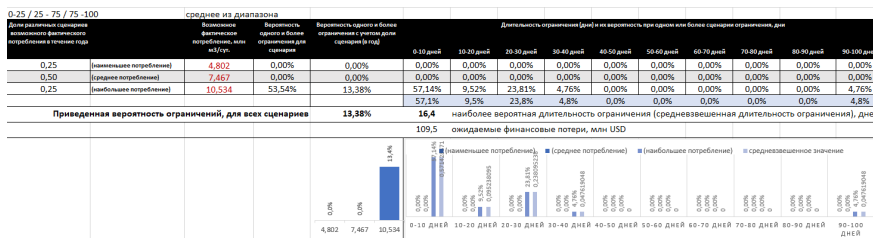


Рис. 4. Средняя длительность ограничения потребителей.

Библиографический список

1. Баженов Ю. В., Баженов М. Ю., Каленов В. П. Основы теории надёжности. – Владимир : ВлГУ, 2021. – 128 с.
2. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М. : Советское радио, 1971. – 272 с.
3. Долгушев Н. В. Введение в прикладной системный анализ / almaGRID – математические модели производственных процессов. – 2019. – URL: <https://almagrid.com/ag2/docs/systemanalysis-introduction> (дата обр. 08.01.2025).
4. Зулкорнеева П. Р., Гайфуллина Ф. Ш. Оценка экономической эффективности с помощью метода Монте-Карло // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 8. – С. 450–452.
5. Каменева С. А., Борискина И. П. Математическое моделирование в экономике. // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 20–21.
6. Макаренко Е. Н., Булгаков С. А. Исследование риск-ориентированного подхода и возможностей его применение во внутреннем контроле. // Учет и статистика. – 2021. – № 1. – С. 20–21.
7. Метод Монте-Карло / Т. В. Тихомирова [и др.] // Colloquium-journal. – 2019. – № 15–9. – С. 122–125. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39210357>.
8. Обоснование принятия решений в управлении промышленным предприятием на основе применения математико-статистических методов / Н. В. Спешилова [и др.] // Экономика и предпринимательство. – 2018. – № 12. – С. 989–994.
9. Окунь Е. В., Гробер Т. А. Применение численных методов Монте-Карло в имитационном моделировании // Молодой исследователь Дона. – 2021. – № 4. – С. 8–10.
10. Райгородский А. М. Модели случайных графов // Труды Московского физико-технического института. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 130–131.
11. Соловьев А. Д., Беляев Ю. К., Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надёжности. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
12. Спешилова Н. В., Спешилов Е. А., Цыкало К. А. Применение статистических методов анализа данных для выявления значимых параметров с целью повышения эффективности управления производственной системой // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 1. – DOI: [10.15862/24ECVN124](https://doi.org/10.15862/24ECVN124).
13. Shepel V. N., Speshilova N. V., Kitaeva M. V. Technology Of Management Decision-Making At Industrial Enterprises In The Digital Economy // . – P. 1520–1531. – URL: <https://www.futureacademy.org.uk/files/images/upload/GCPMED%202018F155.pdf>.