

УДК 517.977: [628.171+628.3]
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-148-159

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ОТКАЗОВ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ

С.Т. Иманбеков, Э.М. Мамбетов

Аннотация. Приведены результаты исследований по оценке риска отказов в работе инженерных систем на примере системы водоотведения. Отмечен низкий уровень надежной работы систем водоотведения в населенных пунктах, что не позволяет создавать необходимые условия для их развития и улучшения жизни населения. Показана необходимость обеспечения населенных пунктов надежными системами инженерного обеспечения, в частности системами водоотведения, обеспечивающими сбор сточных вод, их транспортировку на очистные сооружения, соответствующую очистку сточных вод и безопасное удаление или утилизацию в окружающую среду. Разработана математико-информационная модель прогнозирования отказов в инженерных системах, в частности в системах водоотведения на основе оценки рисков и определения методов их управления.

Ключевые слова: риск отказов; система водоотведения; сбор; утилизация отходов; самотечная система; водоотводящие коллекторы; математико-информационная модель.

ИНЖЕНЕРДИК СИСТЕМАЛАРДАГЫ БУЗУЛУУ КОРКУНУЧУН БАШКАРУУ

С.Т. Иманбеков, Э.М. Мамбетов

Аннотация. Макалада дренаждык системанын мисалында инженердик системалардын иштебей калуу коркунучун баалоо боюнча изилдөөлөрдүн натыйжалары келтирилген. Калктуу конуштардагы дренаждык системалардын ишенимдүү иштешинин төмөн деңгээли белгиленет, бул аларды өнүктүрүү жана калктын турмушун жакшыртуу үчүн зарыл шарттарды түзүүгө мүмкүндүк бербейт. Калктуу конуштарды ишенимдүү инженердик системалар менен, атап айтканда саркынды сууларды чогултууну, аны тазалоочу курулмаларга ташууну, саркынды сууларды тийиштүү түрдө тазалоону жана айлана-чөйрөгө коопсуз ташып чыгарууну же жок кылууну камсыз кылуучу дренаждык системалар менен камсыз кылуу зарылчылыгы көрсөтүлгөн. Тобокелдиктерди баалоонун жана аларды башкаруу ыкмаларын аныктоонун негизинде инженердик системалардагы, атап айтканда дренаждык системалардагы бузулууларды болжолдоо үчүн математикалык жана маалыматтык модель иштелип чыккан.

Түйүндүү сөздөр: иштебей калуу коркунучу; дренаж системасы; чогултуу; таштандыларды чыгаруу; гравитация системасы; дренаждык коллекторлор; математикалык жана маалымат модели.

FAILURE RISK MANAGEMENT IN ENGINEERING SYSTEMS

S.T. Imanbekov, E.M. Mambetov

Abstract. This paper presents the results of research on the assessment of the risk of failures in the operation of engineering systems, by the example of wastewater disposal systems. The low level of reliable operation of wastewater disposal systems in populated areas is noted, which does not allow creating the necessary conditions for their development and improving the lives of the population. It is shown that it is necessary to provide settlements with reliable engineering support systems, in particular, wastewater disposal systems that collect wastewater, transport it to wastewater treatment plants, appropriate wastewater treatment and safe disposal or disposal into the environment. A mathematical and information model has been developed for predicting failures in engineering systems, in particular in wastewater disposal systems based on risk assessment and determination of their management methods.

Keywords: failure risk; wastewater disposal system; waste collection; utilization; gravity system; drainage collectors; mathematical and information model.

Введение. В программе «Стратегия развития страны на 2009–2011 годы» одним из индикаторов, характеризующим экономическое развитие Кыргызстана, определен показатель обеспеченности населения питьевой водой, а также устройство в населенных пунктах водоотводящих сетей и очистных сооружений.

Поскольку большая часть территории страны находится в сейсмоопасной зоне, при планировании размещения инженерных систем необходимо учитывать и факторы, связанные с сейсмической активностью регионов. Для этого необходимо предусматривать различные мероприятия, связанные с обеспечением надежности функционирования инженерных сооружений [1–4].

Проведен анализ результатов исследований отечественных и зарубежных специалистов из Российской Федерации, Турции, Японии, разработки которых могут найти практическое применение на реальных объектах страны [5–7].

За базовый объект исследования принята система водоотведения г. Бишкек, так как в последнее время все чаще проявляются проблемы, связанные с обеспечением сбора, утилизации отходов различного вида, в частности, сбора, отвода и переработки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод.

Представляет практический интерес разработка современных концепций развития и реконструкции существующих и нефункционирующих систем водоотведения и их современное строительство на основе устойчивого функционирования инженерных систем [5, 8].

В работе использованы отчетные материалы, полученные авторами в процессе разработки раздела «Инженерные системы» по блоку «Водоснабжение и водоотведение» к генеральному плану г. Бишкек на период 2006–2008, 2010 и 2025 годы, а также данные концепции развития систем водоснабжения и водоотведения г. Бишкек до 2025 года. Анализ результатов исследований по функционированию системы водоотведения (на примере г. Бишкек) показывает, что на основании данных производственно-эксплуатационного управления «Бишкекводоканал» (далее ПЭУ «БВК») за период с 1994 года по первое полугодие 2011 года, в среднем за год обеспечивается прием и очистка сточных вод в объеме от 98,0 до 105,0 млн м³ в год.

В г. Бишкек принята неполная раздельная самотечная система водоотведения. В системе самотечного водоотведения имеются четыре канализационные насосные станции перекачки сточных вод. На 01 января 2010 года существующая пропускная способность городских очистных сооружений составляла 138,7 млн м³ в год (с учетом расширения мощности сооружений в 1980–1990 гг.). Указанный выше объем сточных вод был определен исходя из принятых для г. Бишкек норм водоотведения, объем которых составляет 410,0 л/сутки на одного человека [3].

Материалы и методы. На основании утвержденного варианта развития г. Бишкек, при разработке генерального плана рекомендован вариант, при котором предусматривается строительство водоотводящих сетей, коллекторов и сооружений, а также расширение существующих городских очистных сооружений до пропускной способности от 480,0 до 760,0 тыс. м³/сутки.

Анализ данных исследований показывает, что при существующей пропускной способности очистных сооружений в объеме 4,39 м³/с, дефицит мощности последней на 1-ю очередь составляет 2,76 м³/с, а на расчетный срок – до 3,84 м³/с. При этом, если бы в расчетах принималась норма водоотведения, рекомендуемая СН КР 40-02:2023 [3], то общий дефицит мощности соответственно составлял бы 2,87 и 4,78 м³/с, соответственно. Это требует увеличения мощности (пропускной способности) городских очистных сооружений до 800 тыс. м³/сутки, что значительно усложнит реализацию плана развития системы водоотведения в рамках генерального плана г. Бишкек, и приведет к необходимости выделения дополнительных земельных участков, необходимых для сооружения новых очистных сооружений.

В настоящее время расчетный объем сточных вод города составляет 7,15 м³/с, с перспективой на 8,23 м³/с. Поэтому развитие очистных сооружений, согласно выполненным расчетам, было рекомендовано осуществлять в диапазоне от 2,76 до 3,84 м³/с, при увеличении общей пропускной способности очистных сооружений до 620 тыс. м³/сутки на 1-ю очередь и до 760 тыс. м³/сутки – на расчетный срок.

Для достижения поставленных целей, в соответствии с утвержденными данными концепции развития системы водоотведения г. Бишкек, необходима реализация ряда мероприятий, таких, как: новое строительство водоотводящих коллекторов и сетей в районах новой и реконструируемой застройки г. Бишкек, а также сооружений на них; проведение ремонтно-строительных работ по реконструкции существующих водоотводящих сетей и коллекторов; повышение эффективности работы локальных очистных сооружений на промышленных объектах; совершенствование и строительство сооружений по обработке осадков сточных вод; расширение действующих очистных сооружений до производительности 620,0 (на первую очередь) и до 760,0 (на расчетный срок) тыс. м³ в сутки; оптимизация норм водоотведения в зависимости от категорий водопотребителей в сторону их уменьшения и др.

Общий объем затрат, необходимых для развития системы водоотведения, в соответствии с утвержденными данными по концепции развития, составляет около ≈1,153 млрд сом., в том числе на первую очередь около 0,63, а на расчетный срок – около 0,53 млрд сом. (таблица 1).

Таблица 1 – Основные технико-экономические показатели по системе водоотведения г. Бишкек в рамках генерального плана

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Существующее положение	На 1-ю очередь	На расчетный срок
1	Численность населения	тыс. чел.	≈680÷≈750	950,0	1200,0
2	Объемы сточных вод	м ³ /с	2,29	7,15	8,23
3	Норма водоотведения для населения	л/сутки на 1-го жителя	310,0÷410,0	480,0	415,0
4	Норма водоотведения для промышленных и коммунальных объектов*	м ³ /га в сутки	---	30	30
5	Укрупненная сметная стоимость**	млн сом.	---	624,0	529,23

* – Также и по технологическим нормам предприятий, согласно ведомственных и отраслевых НТД.

** – Усредненные показатели согласно концепции развития системы водоотведения.

Результаты и обсуждение. Для управления надежностью функционирования системы водоотведения г. Бишкек была поставлена задача разработки математической модели и компьютерного моделирования по автоматизации процесса анализа отказов элементов системы водоотведения [8–11] с учетом сейсмической ситуации на территории г. Бишкек и близлежащих территорий [12].

Авария (отказ) – событие, заключающееся в нарушении работоспособности элемента или системы, т. е. невыполнение возложенной технологическими требованиями задачи [5, 8, 13]. Возникновение отказов во многом зависит от надежности комплекса систем водоотведения в целом. Надежность любой системы должна закладываться уже на стадии проектирования и технико-экономического обоснования и определяться рядом факторов экологических, экономических, социальных и т. д. [14].

Возникновение аварии в работе элементов системы водоотведения приводит к ухудшению экологической обстановки [1, 2, 14].

В качестве индикаторов наблюдения приняты показатели, приведенные в таблице 2. Отдельные отчетные данные по засорам в сетях системы водоотведения г. Бишкека, приводящие к отказам в работе, приведены в таблице 3. В среднем они равны по участкам, что свидетельствует об одинаковом режиме работы водоотводящей сети [9, 10].

В связи с частыми отказами на сетях, с целью обеспечения нормальных условий работы водоотводящей сети, службы эксплуатации регулярно осуществляют профилактические работы по прочистке, реконструкции, ремонту и строительству водоотводящих участков. Данные о производстве работ приведены в таблице 4.

Таблица 2 – Виды индикаторов (показатели).

№ п/п	Показатели
1	Бытовые отходы
2	Мусор
3	Жиры
4	Корка
5	Отходы от скотобойни, кости
6	Корни деревьев и трав
7	Строительный мусор, песок, глина
8	Тряпки
9	Бутылки, разбитые куски стекла
10	Камни
12	Арбузные корки
13	Кишки животных
14	Бумага
15	Волосы
16	Прочие

Таблица 3 – Отчетные данные за период с 1999 по 2003 г. по засорам в системе водоотведения г. Бишкек

Год	1999	2000	2001	2002	2003
Количество засоров, в том числе по участкам, №:	176	171	--	160	255
1	--	54	--	41	63
2	--	50	--	43	67
3	--	34	--	33	51
4	--	38	--	40	73
«КНС»	--	--	--	3	1

Таблица 4 – Статистика работ по аварийной прочистке водоотводящих сетей г. Бишкека за 1992–1996 и 2002–2004 гг.

Месяц	Сведения по участку № 1 г. Бишкека за период 1992–2004 гг.							
	1992	1993	1994	1995	1996	2002	2003	2004
Январь	20	20	20	22	27	--	56	64
Февраль	20	20	20	20	28	--	51	70
Март	22	21	21	20	21	--	64	80
Апрель	23	23	21	20	27	50	68	74
Май	20	20	19	19	24	47	49	47
Июнь	21	22	22	22	--	58	44	--
Июль	24	22	22	21	--	62	74	--
Август	21	20	22	28	--	50	85	--
Сентябрь	23	23	22	41	--	44	78	--
Октябрь	22	21	21	32	--	66	56	--
Ноябрь	21	22	22	43	--	53	38	--
Декабрь	24	23	22	25	--	51	80	--
Итого за год	261	257	254	313	127	481	743	335
В среднем за 1 месяц	≈ 22	≈ 21	≈ 21	≈ 26	≈ 25	≈ 53	≈ 62	≈ 67

Таким образом, на основе приведенных данных по состоянию системы водоотведения г. Бишкек, определения и выбора факторов влияния на надежность функционирования системы водоотведения, была разработана математико-информационная модель прогнозирования отказов в инженерных системах [8–10]. Математическая модель отказов системы, это логическая функция отказа, которая позволяет получить расчетные формулы для вычисления вероятностей отказов системы по известным вероятностям отказов элементов этой системы, которые были получены на основании использования метода прямого опроса специалистов.

Предлагается общая методика решения задачи с однофакторным и двухфакторным анализом, где приводятся данные по наиболее значимым факторам влияния и 14-ти элементам системы водоотведения [10].

По результатам обработки опросных данных выбраны 6 наиболее значимых факторов [8–10].

В результате проведенной работы разработана методика расчетов вероятности отказов с максимальным количеством факторов влияния как по отдельности, так и в совокупности влияния на элементы и узлы системы водоотведения. Для описания и анализа причин отказа системы было применено дерево отказов (определения отказов и режимов работы элементов или узлов, т. е. соединений этих элементов).

Таким образом, можно с большой степенью достоверности решать задачи по определению наиболее уязвимых элементов и узлов системы водоотведения. Полученные результаты могут служить основой для оценки возможности наступления рискованной ситуации в системах водоотведения в населенных пунктах.

Для исследования применяли сведения на основании использования метода прямого опроса специалистов, непосредственно эксплуатирующих систему, либо проводивших определенные исследования и экспериментальные работы по оптимизации технологического режима. Получена оценка степени воздействия различных факторов на элементы системы водоотведения [10]. Также были использованы отчетные и статистические данные по известным отказам в работе элементов системы водоотведения (таблица 5).

Система водоотведения представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, их узлов и соединений [10, 12, 13]. Воздействие фактора влияния «*i*» на элемент «*j*» системы водоотведения принято в виде числа, характеризующего вероятность отказа работоспособности элемента системы или системы водоотведения в целом.

По постановке задачи были заданы:

1. «*N*» элементов системы водоотведения «*k*» видов (наиболее удобнее в виде таблицы).
2. Вероятность отказа каждого элемента при авариях в виде числовых значений.
3. Схема их соединения, являющаяся композицией последовательных и параллельных соединений (логические формулы или схемы).
4. Логическое выражение – условие отказа системы.

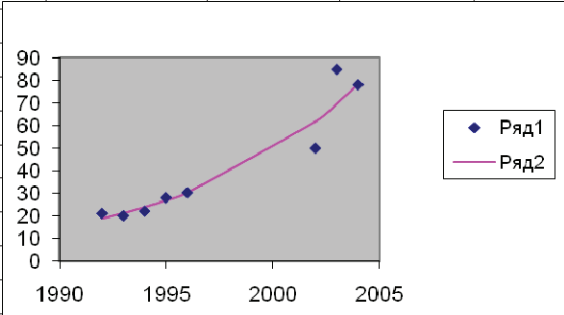
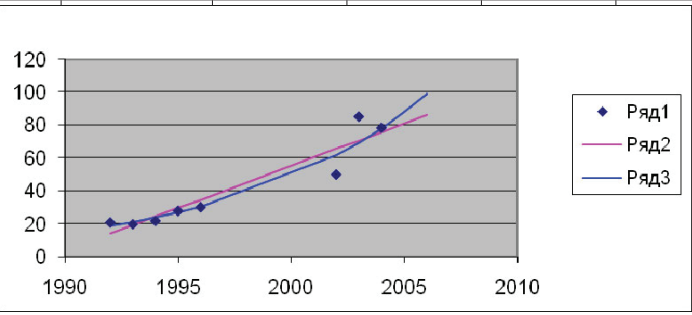
Примечание: В данном случае возможно переформулировать все результаты на «сохранение работоспособности системы».

В работе рассматривались следующие варианты задач. Какова вероятность отказа работоспособности системы при:

- 1) влиянии одного фактора на один элемент;
- 2) влиянии одного фактора на два элемента и т. д.;
- 3) влиянии двух факторов на один элемент и т. д.;
- 4) влиянии трех факторов на элемент и т. д.

Анализ отказов элементов системы с учетом возможных режимов работы элементов и их соединений, осуществляли путем формализованной записи логических связей (конъюнкций и дизъюнкций) указанных режимов [9, 10]. Вывод расчетных выражений основан на применении формулы полной вероятности.

Таблица 5 – Статистика аварий на водоотводящих сетях г. Бишкека

Статистика аварий на водоотводящих сетях г. Бишкека за 1992–2004 гг. (сведения по участку №1)								
№ п/п	Месяц	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	2002 г.	2003 г.
1	Январь	20	20	20	22	27	41,5	56
2	Февраль	20	20	20	20	28	39,5	51
3	Март	22	21	21	20	21	42,5	64
4	Апрель	23	23	21	20	27	50	68
5	Май	20	20	19	19	24	47	49
6	Июнь	21	22	22	22	27,4	58	44
7	Июль	24	22	22	21	30,34	62	74
8	Август	21	20	22	28	30,25	50	85
9	Сентябрь	23	23	22	41	42,5	44	78
10	Октябрь	22	21	21	32	49	66	56
11	Ноябрь	21	22	22	43	48	53	38
12	Декабрь	24	23	22	25	38	51	80
	Итого:	261	257	254	313	392,49	604,5	743
	В среднем	21,75	21,42	21,17	26,08	32,71	50,37	61,91
Факт.	За 1 мес.	21	20	22	28	30	50	85
		21,75	21,42	21,17	26,08	32,71	50,37	61,91
		3,044522	2,995732	3,091042	3,332205	3,409496	3,912023	4,44
ао=	–10254,121							
а1=	5,15472921							
прогноз-(ао+а1×х)		14,09958	19,25431	24,40904	29,56377	34,7185	65,64687	70,80
А=	–233,59147							
В=	0,11873826							
Прогноз – exp(x)		18,82432	21,1976	23,87009	26,87951	30,26835	61,71532	69,49
А)								
В)								

Для решения поставленной задачи удобно применение компьютерного моделирования. Для построения математической модели введены следующие обозначения: $F_1, F_2, \dots, F_i$ – вероятности отказа элементов 1, 2, ..., i при фиксированных факторах.

На основании принятых обозначений математическую модель можно записать в следующем виде. При последовательном соединении элементов 1 и 2 (конъюнкция случайных событий):

$$F1 \div 2 = 1 - T1 \div 2 = F1 + F2 - F1 \times F2 \quad (1)$$

или

$$P(F1, F2) = F1 + F2 - F1 \times F2 \quad (2)$$

При параллельном соединении (дизъюнкция случайных событий):

$$F_{1+2} = F_1 \times F_2 \quad (3)$$

или

$$P_1(F_1, F_2) = F_1 \times F_2. \quad (4)$$

Однофакторный анализ проводили по каждому элементу с шагом $h = 0,1$, и по этим результатам выявляли наиболее чувствительные элементы. Наиболее чувствительными являются те элементы, полный отказ которых при воздействии некоторого фактора дает полный отказ системы.

Далее проводили двухфакторный анализ по двум основным элементам, с варьированием шага $h = 0,1$. Результаты можно проанализировать следующим образом.

Когда первый элемент дает полный отказ, а второй элемент полностью работает, т. е. $x_j^1 = 1$, а $x_j^2 = 0$, и при этом система выдает полный отказ, то фактор воздействия будет «обязательным». А если при этих же условиях система полностью работает, то фактор воздействия будет «необязательным». Если оба элемента дают полный отказ, т. е. $x_j^1 = 1$ и $x_j^2 = 1$, при воздействии данного фактора, при этом система работает частично, либо близка к 100 %-ному отказу, то нужно принимать превентивные мероприятия по повышению надежности работы этого элемента.

Для решения 3-го и 4-го вариантов задач предлагается принять гипотезу о том, что фактор либо выводит из строя элемент, либо не влияет на действие другого фактора. Тогда при одновременном воздействии нескольких факторов можно записать:

Если количество факторов 2:

$$F = 1 - (1 - F_1) \times (1 - F_2). \quad (5)$$

Если количество факторов 3:

$$F = 1 - (1 - F_1) \times (1 - F_2) \times (1 - F_3). \quad (6)$$

Если количество факторов n :

$$F = 1 - (1 - F_1) \times (1 - F_2) \times (1 - F_3) \dots (1 - F_n). \quad (7)$$

При этом допуская вольность – обозначим через « F_i » и событие, и его вероятность. Предлагается следующая методика решения задачи и алгоритмы:

1. Если данная система сложная, то произвести ее декомпозицию (разбивка на подсистемы). Используя формулы (1)–(4) и условия задачи, последовательно составить расчетные формулы для каждой подсистемы, а далее – расчетные формулы соединения подсистем между собой.

2. С помощью компьютерного моделирования получить вероятность отказа всей работы системы водоотведения в зависимости от различных факторов влияния.

3. Вариацией одного из переменных, получить вероятность отказа всей системы от полной надежности до полного отключения элемента. Произвести однофакторный анализ, т. е. варьировать одну из

переменных с шагом, например $h = 0,1$. Здесь выбирается номер фактора и номер одного элемента системы.

4. Вариацией двух из переменных получить вероятность отказа всей системы от полной надежности до полного отключения двух элементов. По основным элементам произвести двухфакторный анализ, т. е. варьировать два из переменных с шагом $h = 0,1$. Здесь выбирается номер фактора и номера двух элементов системы водоотведения.

5. Выбрать соответствующий номер индикатора IPN ($IPN = 2$, по алгоритму 1, указывающий количество факторов, воздействующих одновременно. Используя формулы (5), (6) получить вероятность отказа всей работы системы водоотведения.

Для алгоритма вычислений вероятности отказа системы удобнее брать следующую индексацию:

$$IP = \begin{cases} 0, & \text{вычисляется вероятность отказа системы;} \\ 1, & \text{производится однофакторный анализ;} \\ 2, & \text{производится двухфакторный анализ.} \end{cases} \quad (8)$$

Алгоритм 1. По заданным исходным данным: номеру фактора i , номеру элемента j , значениям x_{ij} (вероятности отказов элементов), индикаторному числу IPN , количеству факторов kol .

- а) Задается значение IPN от 1 до 2.
- б) Если $IPN = 1$, то переход к алгоритму 2.
- в) Задается количество факторов kol от 2 до 12.
- г) Вводятся номера факторов: если $kol = 2$, то вводится 2 номера фактора и номера запоминаются.
- д) Производится вычисление по формуле (5) и формируется новая таблица значений – вероятности отказа элементов (в новой таблице также можно изменить некоторые значения); переход к алгоритму 2 со значением $IP = 0$.

Алгоритм 2. По заданным исходным данным: номеру фактора I , номеру элемента J , значениям x_{ij} (вероятности отказов элементов), индикаторному числу IP , шагу h :

- а) Полагаем $IP = 0, I = 1$.
- б) Увеличиваем I на единицу и вычисляем вероятности отказа всей системы по расчетным формулам (1)–(4) или (5), (6) и «Выход» к п.к.
- в) Если $IP = 1$, то вводим номер фактора I и фиксируем номер элемента J .
- г) Полагаем: $x_{ij} = 0$.
- д) Вычисляем: $x_{ij} = x_{ij} + h$, и с каждым новым x_{ij} вычисляем вероятность отказа всей системы от полной надежности до полного отказа элемента J , (т. е. x_{ij} принимает значение от 0 до 1) и «Выход» к п.к.
- е) Если $IP = 2$, то вводим номер фактора I и фиксируем номера первого элемента J_1 и второго элемента J_2 (т. е. вариация двух переменных).
- ж) Полагаем: $x_{ij}^I = 0$.
- з) Вычисляем: $x_{ij}^I = x_{ij}^I + h$ и для этого значения x_{ij}^I , начиная с $x_{ij}^I = 0$ с шагом h по x_{ij} , вычисляем вероятность отказа всей системы от полной надежности до полного отказа элементов J_1 и J_2 , и «Выход» к п.к.
- и) «Выход» с результатом – вероятностью отказа.

Алгоритмы реализованы на языке программирования в среде Delphi.

Разработанная математическая модель и компьютерное моделирование по автоматизации процесса анализа отказов элементов системы водоотведения являются одним из возможных и существующих на данный момент вариантов оценки воздействия на окружающую среду.

Все известные методы оценки основаны на принципе комплексности анализа различных факторов и способов, при обработке которых существует возможность качественно или количественно оценить степень воздействия какой-либо системы на окружающую среду или определить экономическую

целесообразность применения какой-либо технологии по утилизации и очистки сбросов, выбросов и загрязнений.

Вследствие необходимости сбора и учета большого количества исходных данных для применения уже существующих методик, появилась необходимость в разработке более упрощенного метода оценки воздействия на окружающую среду. Итоговые значения при применении предлагаемой методики должны с повышенной достоверностью и вероятностью давать возможность оценивать по принятым критериям практическую и экономическую целесообразность выбранной технологии и инженерных средств в рассматриваемом проектом решении.

По результатам влияния факторов проведена сортировка влияний по убыванию. Диаграмма сортировки показана на рисунке 1.

Аппроксимируя полученные данные, определяем коэффициент демпфирования, характеризующий степень ослабления по уравнению:

$$y = a \times (\exp(b_i)). \quad (9)$$

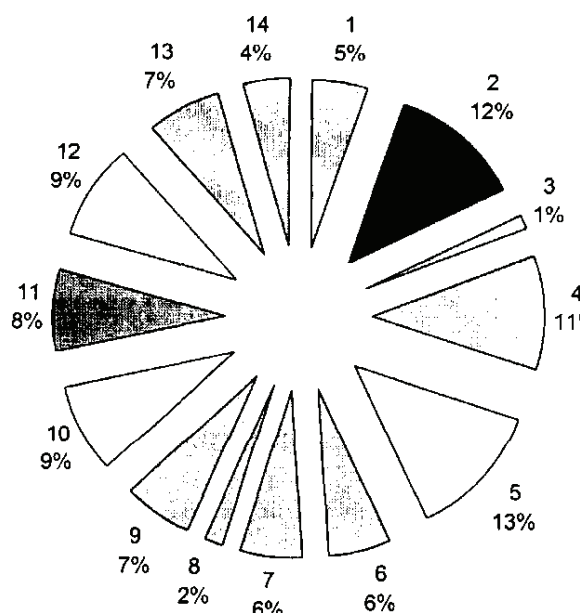


Рисунок 1 – Диаграмма влияния факторов воздействия на систему водоотведения: 1 – землетрясения до 8 баллов; 2 – землетрясения свыше 8 баллов; 3 – общественный и социальный фактор (контроль общества и влияние его на изменение экологии); 4 – временное воздействие (срок эксплуатации сооружений); 5 – нарушение условий эксплуатации: отсутствие квалифицированного обслуживающего персонала; несвоевременный текущий и профилактический ремонт систем; 6 – антропогенное воздействие (подразделяется на механическое, физическое, химическое, биологическое): воздействие на систему водоотведения, оказываемое в процессе жизнедеятельности людей; 7 – механическое воздействие, т. е. воздействие, непосредственно оказываемое на систему в результате ее эксплуатации; 8 – климатические условия; 9 – проведение СМР (отклонение от проектных документов, нарушение условий монтажа системы и т. д.); 10 – нарушение энергоснабжения (отказ системы по причине отсутствия электроэнергии); 11 – недостаточная квалификация обслуживающего персонала; 12 – нарушение функционального режима работы (сооружение не в полной мере выполняет своих функций); 13 – превышение качественных и количественных показателей сточных вод поступающих на ОС; 14 – прочие факторы

Анализ полученных результатов показывает, что первые 54 сочетания влияния определенного фактора на элемент сооружения оказывают относительно слабое влияние на работы системы в целом, которое можно предупредить и предотвратить. При сочетании влияния после 54 сочетаний влияния приводит к аварии всей системы.

Надежность системы [1, 2, 6, 10], как одно из ее важнейших свойств, является одним из существенных показателей качества функционирования. Вероятность аварии в системе водоотведения определяется надежностью составных элементов [1, 14]. Определение отказов элементов комплекса позволяет определить надежность системы в целом, что можно выразить в виде зависимости:

$$H_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^i (H_i), \quad (10)$$

где $H_{\text{общ}}$ – надежность системы водоотведения; H_i – надежность отдельных элементов системы.

Таким образом, в зависимости от надежности и функционирования элементов системы можно разграничить основные показатели комплекса на полную работоспособность, неполную работоспособность и неработоспособность (состояние отказа).

Математическая модель отказов системы, т. е. логическая функция отказа, позволяет получить расчетные формулы для вычисления вероятностей отказов системы по известным вероятностям отказов элементов этой системы, которые были получены на основании использования метода прямого опроса специалистов.

Фактор риска – признак, который самостоятельно связан с вероятностью возникновения негативного события настолько, что может быть использован для его прогнозирования [1, 5]. Отдельные факторы можно рассматривать, при прочих равных условиях, как меру (составную часть) риска.

$$\text{Риск}_j = \text{Вероятность}_j \times \text{Потери (Ущерб)}_j. \quad (11)$$

Исходя из структуры риска целесообразно осуществлять сбор и анализ информации по следующим группам факторов:

1. Факторы, определяющие вероятность возникновения аварий на элементах.
2. Факторы, влияющие на величину ущерба (внеплановых финансовых потерь).

На основании комплекса проведенных исследований составляются ориентировочные матрицы, позволяющие оценить влияние наиболее значимых из рассмотренных выше факторов на величину относительного риска или страхового рейтинга элемента. При этом в качестве исходной информационной базы нужно принять реальную статистику и описание аварий на объектах. Также можно отдельно рассматривать факторы, влияющие на вероятность аварии и ее последствия, и проводить однофакторный и двухфакторные анализы с вариацией элементов.

Основные результаты и выводы. Надежная работа инженерных систем, в том числе сетей водоотведения, во многом определяется надежностью функционирования ее элементов, которые непосредственно связаны с разработкой новых эффективных методов управления рисками и оценки экономических ущербов [1, 7, 10, 13, 14]. Предложен научно обоснованный эффективный метод управления рисками в инженерных системах на примере системы водоотведения. В данном случае рассматривается взаимосвязь всех элементов системы водоотведения и влияния на них различных факторов, приводящих к различным показателям по причиняемым ущербам. Это позволяет обоснованно принимать решения как на стадии проектирования и строительства объектов инженерных систем, так и на стадии их эксплуатации, что в конечном итоге приведет к увеличению продолжительности эксплуатации с минимизацией возможных рисков и экономических ущербов, что соответствует требованиям правового акта [15].

В результате проведенных научно-исследовательских работ получены следующие результаты:

1. На примере систем водоотведения установлено, что все исследования в плане управления рисками должны вестись как поэлементно, так и во взаимосвязи работы всех элементов в целом. На основании анализа рискованных ситуаций выявлены основные факторы влияния на работу инженерных

систем в целом для условий Кыргызской Республики, действие которых приводит к рискам и в последующем к отказу в работе элементов.

2. Проведен анализ разработанного генерального плана г. Бишкека на 2010÷2025 гг. по разделу «Инженерное обеспечение территорий» по блоку «Водоснабжение и водоотведение».

Актуальность развития системы водоотведения для г. Бишкека очевидна. Предварительное моделирование возможных отказов позволяет рационально проводить проектные работы по выбору трассы и диаметров трубопроводов с учетом требований нормативных правовых актов и использования современных методик и нормативов [3, 7].

3. Определены виды и факторы влияния, приводящие к отказам в работе элементов водоотводящей сети.

4. Разработана предварительная рабочая информационно-математическая модель для определения возможных отказов на водоотводящих сетях и выбор рационального варианта составляющих элементов системы в зависимости от фактора влияния. Проведена апробация расчетов (численный эксперимент) возможных отказов в системе водоотведения г. Бишкека с учетом различных вариантов воздействия факторов (на 1 и несколько элементов и т. д.).

5. Установлено, что первые 54 сочетания влияния определенного фактора на элемент системы (сооружения) оказывают относительно слабое влияние на работу системы в целом, которое можно предупредить и предотвратить. При варианте сочетаний после 54, влияние факторов на работу системы приводит к аварии всей системы.

6. Комплексными исследованиями установлено, что:

- разработанная предварительная математическая модель дает возможность автоматизации процесса оценки вероятностей аварий элементов системы водоотведения, которая является одним из возможных и существующих на данный момент вариантов оценки воздействия на окружающую среду;
- метод расчета уровня устойчивости коммуникаций в виде двумерной, цифровой, динамической системы позволяет описывать и прогнозировать поведение трубопроводов;
- разработка основ и подходов по автоматизации процесса прогнозирования аварий с уменьшением сбора и анализа исходного материала и данных, позволяет выбрать наиболее оптимальные методы управления рисками и упростить процесс оценки воздействия на окружающую среду.

7. Разработан графоаналитический метод оценки риска и экономического ущерба, а также методология реализации мероприятий по минимизации рисков и ущерба.

Благодарность. Авторы выражают благодарность специалистам производственно-эксплуатационного управления «Бишкекводоканал», а также научным и инженерно-техническим сотрудникам институтов КыргызНИИП градостроительства и КыргызНИИП сейсмостойкого строительства за оказанную техническую помощь и участие в обсуждении результатов работ. Кроме того, выражают глубокую благодарность члену-корреспонденту НАН КР, проф. П.С. Панкову и д-ру физ.-мат. наук, проф. Г.М. Кененбаевой за активное участие и помощь в разработке математической модели по автоматизации процесса оценки вероятностей аварий (отказов) элементов системы водоотведения, а также Госстрою КР, который оказал финансовую поддержку, благодаря которой были проведены настоящие исследования.

Поступила: 28.05.2025; рецензирована: 11.06.2025; принята: 13.06.2025.

Литература

1. Иманбеков С.Т. Управление рисками в инженерных системах: учебник для вузов / С.Т. Иманбеков, К.Д. Бозов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. 160 с.
2. Иманбеков С.Т. Управление безопасностью функционирования инженерных систем в кризисных ситуациях природного или техногенного характера / С.Т. Иманбеков // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 7. С. 61–64.

3. СН КР 40-02:2023 Водоотведение. Наружные сети и сооружения (актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения; утв. приказом ГААСЖКХ при КМ КР от 01 декабря 2023 года № 64-нпа) / Госстрой КР. Бишкек: ГС КР, 2023. 117 с.
4. *Иманбеков С.Т.* Анализ возможных аварий в системах водоотведения на основании вычисления вероятностей отказа: матер. докл. науч.-практ. сем. «Особенности прогнозирования и строительства горных поселков в КР с учетом региональных природно-климатических условий» / С.Т. Иманбеков, Г.М. Кененбаева, А.С. Хромов. Бишкек: Илим, 2002. С. 159–167.
5. *Иманбеков С.Т.* Водоотведение: учебник для вузов / С.Т. Иманбеков, И.А. Абдурасулов, К.Т. Баканов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2019. 332 с.
6. *Иманбеков С.Т.* Актуализация строительных норм в области водоснабжения и водоотведения / С.Т. Иманбеков, Э.М. Мамбетов, К.Т. Абдылдабеков, Ж.Т. Асанбекова // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 4. С. 142–147.
7. *Иманбеков С.Т.* Диагностика, инженерное обследование и определение износа наружных инженерных сетей и сооружений: учебник для вузов / С.Т. Иманбеков, Э.Б. Ибраимова, Г.В. Косивцов. Бишкек: Ай-ат, 2014. 96 с.
8. *Иманбеков С.Т.* Анализ возможных аварий в системах водоотведения на основании вычисления вероятностей отказов / С.Т. Иманбеков, Г.М. Кененбаева, А.С. Хромов // Наука и новые технологии. 2002. № 3. С. 80–85.
9. *Иманбеков С.Т.* Об одном способе автоматизации анализа последствий возможных аварий в системе водоотведения / С.Т. Иманбеков, П.С. Панков, Г.М. Кененбаева, Ж.Н. Муратпаева // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. 2005. Вып. 3. Серия 3. С. 31–37.
10. *Иманбеков С.Т.* Возведение и строительство водопроводных и водоотводящих сетей и сооружений: учебник для вузов / С.Т. Иманбеков, А.А. Абдыкалыков, К.Т. Абдылдабеков, А.Т. Султакеева. Бишкек: КГУСТА, Айат, 2014. 132 с.
11. СН КР 20-02:2024* Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования (утв. приказом Госстроя КР от 12 августа 2024 года № 75-нпа). Бишкек: ГС КР, 2024. 131 с.
12. *Иманбеков С.Т.* Метод наблюдения за функционированием работы линейного сооружения / С.Т. Иманбеков // Наука и инновационные технологии. 2017. № 3. С. 161–165.
13. *Иманбеков С.Т.* Управление техносферной безопасностью: учебник для вузов / С.Т. Иманбеков, А.К. Калчороев. Бишкек: КГТУ, ИЦ «Техник», 2017. 96 с.
14. Постановление Кабинета Министров КР от 10 мая 2024 года № 240 «Об утверждении Положения о порядке выдачи документов на проектирование, строительство и иные изменения объектов недвижимости и оценки соответствия вводимых в эксплуатацию завершаемых строительством объектов в Кыргызской Республике».