

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Н.И.Самойленко, А.Б.Костенко, Т.С.Сенчук,  
И.А.Гавриленко, А.В.Лобан

**АДЕКВАТНОСТЬ  
МОДЕЛЕЙ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ  
НАДЁЖНОСТИ  
ТРУБОПРОВОДНЫХ  
СИСТЕМ**



Харьков - 2009



**Министерство образования и науки Украины  
Харьковская национальная академия городского  
хозяйства**

**Н.И.Самойленко, А.Б.Костенко, Т.С.Сенчук,  
И.А.Гавриленко, А.В.Лобан**

**АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛЕЙ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ ТРУБО-  
ПРОВОДНЫХ СИСТЕМ**

*Под редакцией Н.И.Самойленко*

**Издательство «НТМТ»**

**Харьков – 2009**

УДК 681.32:519.713

С17

ББК 65.9(2)441

Самойленко М.И., Костенко О.Б., Сенчук Т.С., Гавриленко І.О., Лобан О.В. Адекватність моделей функціональної надійності трубопровідних систем: Монографія. – Х.: Видавництво «НТМТ», ХНАМГ, 2009. – 115 с. (рос. мовою).

Самойленко Н.И., Костенко А.Б., Сенчук Т.С., Гавриленко И.А., Лобан А.В. Адекватность моделей функциональной надёжности трубопроводных систем: Монография. – Х.: Издательство «НТМТ», ХНАГХ, 2009. – 115 с.

Рекомендовано Ученым советом Харьковской национальной академии городского хозяйства в качестве монографии, протокол № 10 от 28 августа 2009 г.

#### Рецензенты:

**А.И.Колосов** – зав. кафедрой высшей математики Харьковской национальной академии городского хозяйства, доктор физико-математических наук, профессор.

**М.Д.Гинзбург** – зав. научно-исследовательского центра №11 Научно-исследовательского института АСУТРАНСПГАЗ, доктор технических наук, профессор.

Излагается аналитический метод получения математических моделей для расчета функциональной надежности трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой. Приводится универсальная и упрощенная методики проверки адекватности получаемых моделей.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, связанных с проектированием, эксплуатацией и развитием трубопроводных систем.

Табл.: 26. Ил.: 37. Библиограф. наименований: 36.

ISBN 978–966–8603–87–7

© Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
Самойленко Н.И., 2009

## Содержание

Предисловие . . . . .	5
<b>Раздел 1</b>	
<b>Расчёт функциональной надёжности трубопроводных систем методом аварийно-ремонтных зон . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Формирование математической модели трубопроводной сети . . . . .	11
1.2. Разбиение трубопроводной сети на аварийно-ремонтные зоны. . . . .	17
1.3. Расчет технической надёжности аварийно-ремонтной зоны как независимого макроэлемента в структуре трубопроводной системы . . . . .	27
1.4. Преобразование исходного графа сети в макрограф АРЗ . . . . .	31
1.5. Построение упрощенного макрографа АРЗ сети относительно конкретного потребителя . . . . .	35
1.6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя . . . . .	38
1.7. Математическая модель функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя. . . . .	40
<b>Раздел 2</b>	
<b>Адекватность моделей функциональной надёжности трубопроводных систем . . . . .</b>	<b>45</b>
2.1. Цели проверки адекватности и пути их достижения. . . . .	45
2.2. Особенности вычислительного эксперимента для проверки адекватности конкретной математической модели . . . . .	49
2.3. Определение параметров отказов трубопроводных участков. . . . .	50
2.4. Определение параметров отказов запорной арматуры. . . . .	57
2.5. Привязка отказов трубопроводов к аварийно-ремонтным зонам. . . . .	61

## Содержание

2.6.	Построение карт влияния отказов на поставку целевого продукта конкретным потребителям . . . . .	62	
2.7.	Построение временных диаграмм поставки целевого продукта конкретным потребителям . . . . .	69	
<b>Раздел 3</b>			
<b>Реализация вычислительного эксперимента по проверке адекватности моделей функциональной надёжности . . . . .</b>			<b>73</b>
3.1.	Процедуры универсального вычислительного эксперимента для проверки адекватности моделей функциональной надёжности трубопроводных систем. . . . .	73	
3.2.	Особенности вычислительного эксперимента для проверки адекватности моделей функциональной надёжности простейших трубопроводных систем . . . . .	75	
3.3.	Упрощённый вычислительный эксперимент по проверке адекватности моделей функциональной надёжности простых трубопроводных сетей . . . . .	79	
3.4.	Вычислительный эксперимент по проверке адекватности моделей функциональной надёжности с учётом надёжности запорной арматуры . . . . .	87	
Послесловие . . . . .			100
<b>Приложения . . . . .</b>			<b>102</b>
Приложение А. Вычислительный эксперимент ВЭ-3 . . . . .			102
Приложение В. Вычислительный эксперимент ВЭ-4 . . . . .			107
Список использованной литературы . . . . .			112

## ***Предисловие***

Украина занимает одно из первых мест в мире по насыщенности магистральными и распределительными трубопроводными системами. Особенно это касается газовых систем, доставшихся Украине по наследству от бывшего СССР. В настоящее время трубопроводные системы продолжают развиваться и постоянно отвоевывать всё новые и новые позиции в различных отраслях хозяйственной деятельности. Всё чаще можно услышать в экономических обзорах о перспективных проектах по созданию новых магистральных нефтеперекачивающих и газовых систем, по развитию существующих водопроводных и тепловых магистралей. Строительство новых городских микрорайонов в обязательном порядке предполагает проектирование и создание коммунальных трубопроводных распределительных систем с различным целевым продуктом (газ, вода, сжатый воздух и пр.). Развитие распределительных и магистральных трубопроводных систем взаимосвязано. Расширение сети распределительных систем автоматически требует соответствующего развития магистральных систем, и наоборот.

Сооружаемые трубопроводные системы, как и новые трубопроводные участки в существующих системах, обладают достаточной надёжностью и не вызывают особой тревоги по поводу возможных непредвиденных перебоев с поставкой целевого продукта потребителю. В непрерывности поставки целевого продукта потребителям в равной степени заинтересованы и производители целевого продукта, и эксплуатационники трубопроводных систем, и потребители.

Увы, достаточно высокой надёжностью обладают только трубопроводные системы с малым сроком эксплуатации. Какую бы начальную прочность не имели системы, какой бы устойчивостью к коррозии и повреждениям не обладали, время неотвратимо работает против них. Полувековая эксплуатация большинства

трубопроводных систем Украины сильно отразилась на их способности работать без сбоев и выполнять свои функциональные задачи. Всё чаще средства массовой информации говорят о высокой степени изношенности существующих трубопроводных систем, росте их аварийности и угрозы техногенных катастроф, необходимости срочной замены или безотлагательного восстановления работоспособности отдельных участков и целых систем. К тому же, ввод новых участков вовсе не гарантирует обязательного повышения функциональной надёжности всей системы.

В условиях экономического кризиса, поразившего большинство стран мира, и рыночной экономики, которую стремится поддерживать и развивать Украина, проблема надёжности становится особенно актуальной. «Любой предприниматель, вкладывающий личные материальные и денежные средства в производство или несущий ответственность за использование государственных средств, хочет быть уверенным в получении положительного конечного результата. С этой целью разрабатывается бизнес-план, анализ которого может дать ответ на вопрос, какова целесообразность той или иной производственной инновации. Основным показателем бизнес-плана – получаемая прибыль – является очень важной характеристикой эффективности принимаемых решений. Но в условиях жесткой конкуренции руководствоваться только одной прибылью, какой бы она ни была заманчивой, – это недопустимая вольность, способная погубить самые перспективные начинания и привести к нежелательным результатам. Чтобы избежать неоправданного риска, следует при оценке эффективности принимаемых решений обязательно учитывать показатель надёжности» [28].

Все субъекты магистральных и распределительных трубопроводных систем предъявляют определённые требования к их надёжности. Эти требования определяют нижний допустимый порог надёжности. Если надёжность системы опустится ниже допустимого порога, то потребитель не получит необходимого для него целевого продукта в нужном количестве или заданного качества и, в конечном счёте, откажется от услуг транспортного или коммунального предприятия. Такого отказа, в первую очередь, следует ожидать от потребителей с непрерывным производственным

циклом, когда срыв поставок приводит к большим материальным потерям или экологическим катастрофам.

Для производителей целевого продукта и эксплуатационников низкая надёжность трубопроводных систем – это потеря потребителей, рост финансовых потерь из-за судебных издержек и штрафных санкций, бесперспективность развития рынка. И как следствие – снижение прибыли для производителей от реализации целевого продукта, а для эксплуатационников – от простоев и частичного использования транспортных мощностей.

Для всех субъектов, связанных с трубопроводной системой, проблема надёжности является противоречивой. Так, производители целевого продукта и потребители, с одной стороны, хотят, чтобы трубопроводная система была надёжной, а с другой – чтобы транспортные услуги были дешёвыми. Эксплуатационники, с одной стороны, стараются обеспечить надёжность системы в обозримом будущем на должном уровне, а с другой – выделять как можно меньше финансовых, материальных и трудовых ресурсов для достижения и поддержания этого уровня.

Устранение противоречия может быть достигнуто только с помощью отыскания компромиссного значения текущей надёжности, которое в равной степени удовлетворяло бы всех субъектов системы. Компромиссное значение обязательно должно быть не ниже минимально допустимой величины, оговоренной всеми субъектами в двухсторонних договорных обязательствах. При этом отклонение от минимально допустимого значения в сторону увеличения должно быть незначительным, поскольку повышение надёжности для действующих систем даже на сотые доли процента связано с крупными ресурсными затратами.

В сложившихся условиях для успешного разрешения проблемы необходимо иметь достоверный метод построения математических моделей для расчёта показателей функциональной надёжности.

Существующие методы расчёта надёжности трубопроводных сетей ориентированы на расчёт показателей, характеризующих их техническое состояние [3, 8-9, 13-18, 22-23] или точность гидравлического расчёта по доставке и распределению целевого

Предисловие

продукта [10–12]. Вопросы же функциональной надёжности трубопроводных сетей или не рассматриваются вообще, или касаются только их оценки [19].

В настоящей монографии излагается аналитический метод генерации математических моделей для расчета точного значения показателя функциональной надёжности трубопроводных систем (вероятности бесперебойной поставки целевого продукта в течение определённого периода времени) и доказательства адекватности расчётных моделей.

В основу монографии положены исследовательские работы, проводимые в 1998 – 2009 г.г. коллективом ученых кафедры прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства в составе: Самойленко Н.И. [20, 24–34], Сенчук Т.С. [33, 36], Рудя И.А. [21–23], Гавриленко И.А. [5–7, 34], Костенко А.Б., Протопоповой В.П., Лобан А.В.

*Авторы*

# РАЗДЕЛ 1

## РАСЧЁТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ АВАРИЙНО-РЕМОНТНЫХ ЗОН

Структура трубопроводной транспортной системы (в дальнейшем – ТТС) оказывает большое влияние на её функциональную надёжность, т.е. на способность системы решать свою основную задачу – непрерывно транспортировать целевой продукт (в дальнейшем – ЦП) потребителю. Из систем с равными техническими параметрами трубопроводов более высокой функциональной надёжностью обладают те, структура которых обеспечивает больше альтернативных маршрутов транспортирования ЦП от источников к потребителям. Протяженность маршрутов транспортирования отрицательно сказывается на надёжности системы: чем длиннее маршрут, тем ниже её функциональная надёжность.

Выявление и учёт зависимости функциональной надёжности системы от её структуры играет важную роль в проектировании, эксплуатации и развитии ТТС. Для успешного решения задач проектирования ТТС, рациональной эксплуатации и выбора оптимального варианта развития существующих ТТС необходимо использовать метод расчёта функциональной надёжности, который с высокой адекватностью позволял бы рассчитывать вероятность непрерывного транспортирования ЦП от источника к потребителю. Метод должен учитывать как протяженность трубопроводов, так и любую особенность структуры трубопроводной системы, влияющую на искомую функциональную надёжность.

Трубопроводная транспортная сеть – наиболее важная и наиболее сложная часть ТТС, осуществляющая транспортировку и распределение ЦП. Фактически, расчёт функциональной надёж-

ности трубопроводной транспортной системы сводится к расчёту функциональной надёжности трубопроводной сети. Это значит, что расчёт производится без учёта активных источников и в условиях неопределённости отбора ЦП потребителями.

Среди существующих расчётных методов функциональной надёжности ТТС наиболее перспективным является аналитический метод, теоретические основы которого подробно изложены в [27]. Метод удачно учитывает пространственную структуру и текущее техническое состояние ТТС, а результатом его использования является конкретное значение (не оценка) функциональной надёжности на расчётный период эксплуатации системы.

В основу метода положено разбиение ТТС на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ) и замена структуры ТТС макроструктурой АРЗ, которая полностью наследует функциональные особенности системы, в т.ч. и её функциональную надёжность. По этой причине в дальнейшем данный аналитический метод расчёта функциональной надёжности ТТС будем называть *методом АРЗ*.

Рассмотрим основные положения метода АРЗ. Для упрощения и конкретизации каждого этапа в методе АРЗ в качестве объекта приложения возьмём водопроводную ТТС, хотя нет никаких принципиальных причин для её особого выделения из рассматриваемого множества напорных трубопроводных сетевых систем.

Метод АРЗ включает семь последовательных этапов [27]:

1. Формирование математической модели трубопроводной транспортной сети со сложной топологической структурой в виде взвешенного графа.

2. Разбиение исходного взвешенного графа сложной трубопроводной транспортной сети на подграфы (макроэлементы), каждый из которых соответствует одной АРЗ.

3. Расчет технической надежности АРЗ как независимого макроэлемента в функционировании ТТС.

4. Преобразование исходного взвешенного графа сети большой размерности во взвешенный макрограф АРЗ малой размерности (замена микрографа каждой АРЗ одной вершиной).

5. Построение упрощенного макрографа АРЗ относительно конкретного потребителя трубопроводной транспортной сети.

6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя.

7. Формирование математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя с помощью классических методов теории надёжности технических систем и непосредственный расчёт функциональной надёжности.

### 1.1. Формирование математической модели трубопроводной сети

В качестве математической модели распределительной трубопроводной сети, однозначно описывающей распределительную сеть со сложной структурой с целью последующего построения математической модели для определения функциональной надёжности системы, выступает взвешенный граф

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p), \quad (1.1)$$

где  $V$  – множество вершин графа, соответствующих водопроводным колодцам, источнику питания и потребителям;  $E$  – множество дуг графа, соответствующих реальным трубопроводным участкам;  $z, l, \lambda, \mu, p$  – весовые функции на рёбрах графа, соответственно определяющие наличие и расположение запорной арматуры на участке, длину участка, интенсивность износа и интенсивность восстановления участка, техническую надёжность запорной арматуры на участке.

В общем случае граф (1.1) не является ориентированным. В задачах, связанных с проектированием и эксплуатацией ТТС, ориентация графа служит для указания направления транспорта ЦП на каждом трубопроводном участке. При расчёте функциональной надёжности поставки ЦП потребителям информация о направлении движения ЦП не используется, т.е. функциональная надёжность инвариантна по отношению к направлению транспорта ЦП. При необходимости направление движения ЦП на каждом участке в проектируемых и эксплуатируемых сетях определяется

Расчёт функциональной надёжности

с помощью гидравлического расчёта [1–2, 10-12], который проводят до начала расчёта функциональной надёжности.

Конкретизируем состав и назначение всех элементов математической модели (1.1).

Положим, что множество вершин определяется выражением

$$\mathbf{V} = \{v_i\}_1^n. \quad (1.2)$$

Тогда множество дуг определится выражением

$$\mathbf{E} = \{e_{ij} = (v_i, v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, i \neq j\}. \quad (1.3)$$

Математическое описание множества всех задвижек и их расположения на трубопроводе осуществляется с помощью весовой функции  $z$  на множестве  $\mathbf{E}$ , которая отображает его на множество  $\{0, 1, 2, 3\}$  по правилу  $z(e_{ij}) = z_{ij}$ , причем

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{без задвижек;} \\ 1, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в начальном колодце } v_i; \\ 2, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в конечном колодце } v_j; \\ 3, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с двумя задвижками.} \end{cases} \quad (1.4)$$

Ещё четыре весовые функции вводятся для указания параметров трубопроводов, влияющих на результаты расчета надёжности поставки ЦП конкретным потребителям, а именно:

– функция расстояния  $l$ , соотносящая каждой дуге графа  $e \in \mathbf{E}$  действительное число  $l(e) > 0$  в качестве параметра длины соответствующего трубопровода;

– функция интенсивности отказов  $\lambda$ , соотносящая каждой дуге графа  $e \in \mathbf{E}$  действительное число  $\lambda(e) > 0$ , которое фиксирует значение параметра интенсивности отказов соответствующего трубопровода;

– функция интенсивности восстановления  $\mu$ , соотносящая каждой дуге графа  $e \in \mathbf{E}$  действительное число  $\mu(e) > 0$ , которое фиксирует значение параметра интенсивности восстановления соответствующего трубопровода после его выхода из строя;

– весовая вектор-функция технической надёжности запорной арматуры  $\mathbf{p}$ , соотносящая каждой дуге графа  $e \in \mathbf{E}$  двухкомпонентную вектор-строку  $\mathbf{p}_{ij}^T = [p^- \quad p^+]$ , элементами которой являются вероятности безотказной работы запорной арматуры, расположенной в начале и конце соответствующего трубопровода, причем

$$\mathbf{p}_{ij}^T = \begin{cases} [1 \quad 1] & \text{при } z(e_{ij}) = 0; \\ [p^-(e) \quad 1] & \text{при } z(e_{ij}) = 1; \\ [1 \quad p^+(e)] & \text{при } z(e_{ij}) = 2; \\ [p^-(e) \quad p^+(e)] & \text{при } z(e_{ij}) = 3. \end{cases} \quad (1.5)$$

Аргументами  $p^-(e)$  и  $p^+(e)$  функции (1.5) являются вероятностные величины, представляющие собой действительные числа из диапазона  $[0, 1]$ . Аргумент  $p^-(e)$  определяет степень износа и состояние запорной арматуры, находящейся в начале трубопровода, аргумент  $p^+(e)$  – в конце трубопровода. При отсутствии запорной арматуры на каком-либо конце трубопровода соответствующие аргументы функции (1.5) приравниваются к единице.

Выражения (1.1) – (1.5) образуют математическую модель трубопроводной сети для решения задач, связанных с построением математических моделей функциональной надёжности в зависимости от пространственной структуры трубопроводной сети.

Наличие математической модели для конкретной трубопроводной сети является необходимым условием для программной реализации процедуры разбиения исходного графа сети на аварийно-ремонтные зоны, построения макрографа сети (графа АРЗ) и вычисления технической надёжности каждой зоны.

Сформируем математическую модель для конкретной трубопроводной сети, которая входит в состав системы, изображенной в виде графа на рис. 1.1. Данная сеть будет использована в качестве примера для всех последующих этапов метода АРЗ.

Трубопроводная сеть питается от одного активного источника  $O_{II}$  и снабжает целевым продуктом четырёх потребителей:  $O_{II1}$ ,  $O_{II2}$ ,  $O_{II3}$  и  $O_{II4}$ . Сама трубопроводная транспортная сеть содержит пятнадцать колодцев (вершины графа с номерами от 1 до 15), двенадцать задвижек с обозначением  $a_j$ ,  $j = \overline{1,12}$ , одну задвижку с обозначением  $a_c$  и шестнадцать трубопроводных участков (рёбра графа с обозначением  $t_i$ ,  $i = \overline{1,16}$ ). Все задвижки в трубопроводной сети условно изображены на схеме вне колодцев – рядом с вершиной, в соответствующем колодце которой реально расположена та или иная задвижка.

Согласно (1.1), математическая модель для рассматриваемой трубопроводной сети определяется графом

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p).$$

Здесь  $V = \{v_i\}_1^{15} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$  – множество вершин;  $E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, i \neq j\} = \{(1, 2)$

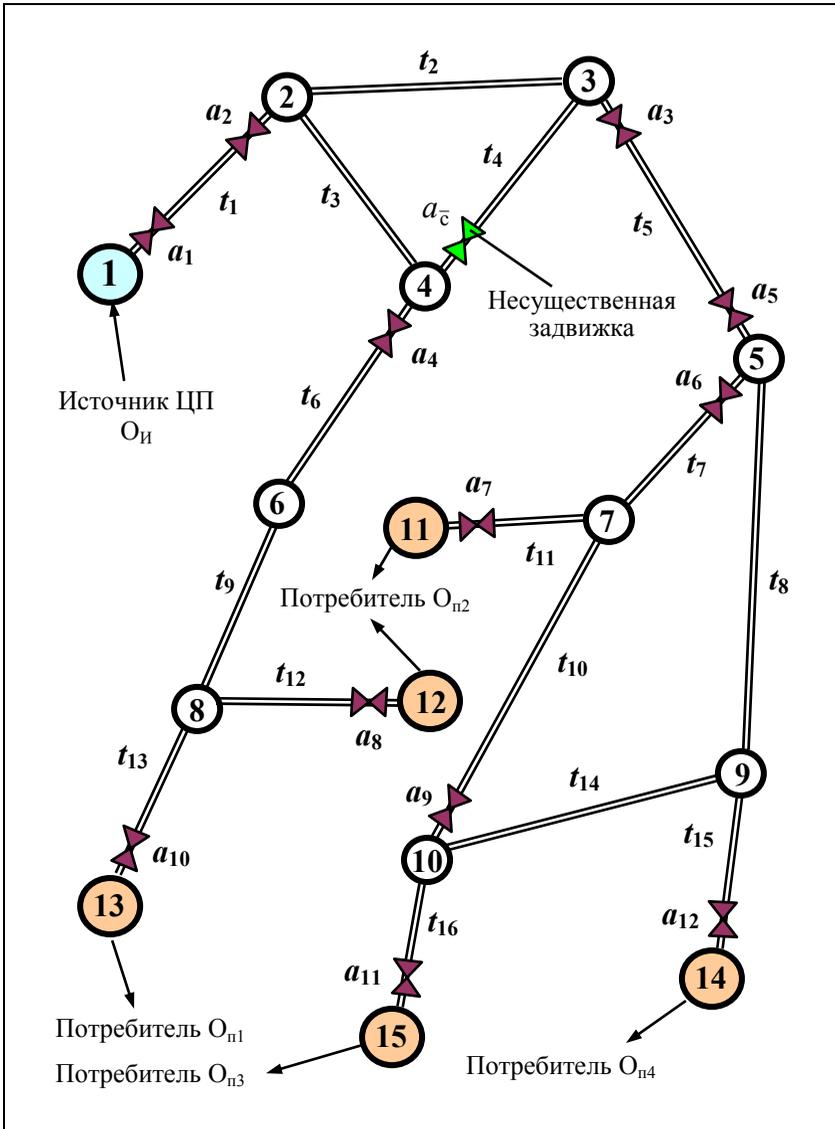


Рис. 1.1 – Схема трубопроводной системы

Расчёт функциональной надёжности

$(2\ 3)(2\ 4)(3\ 4)(3\ 5)(4\ 6)(5\ 7)(5\ 9)(6\ 8)(7\ 10)(7\ 11)(8\ 12)$   
 $(8\ 13)(9\ 10)(9\ 14)(10\ 15)$  – множество рёбер. Значения весовых функций  $z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$  на ребрах графа заданы в табличной форме (табл. 1.1).

Таблица 1.1  
 Задание весовых функций взвешенного графа сети

№ п.п.	Ребро $e_{ij}$	Весовая функция, [ед. измерения]				
		$z(e_{ij})$	$l(e_{ij}), [км]$	$\lambda(e_{ij}), [км^{-1} год^{-1}]$	$\mu(e_{ij}), [год^{-1}]$	$\mathbf{p}^T(e_{ij})$
1	(1 2)	3	10	0,20	1 / 0,01	[ 0,99 0,98]
2	(2 3)	0	8	0,26	1 / 0,007	[ 1 1]
3	(2 4)	0	7	0,26	1 / 0,007	[ 1 1]
4	(3 4)	2	6	0,26	1 / 0,007	[ 1 0,98]
5	(3 5)	3	7	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 0,97]
6	(4 6)	1	5	0,26	1 / 0,007	[ 0,98 1]
7	(5 7)	1	4	0,40	1 / 0,003	[ 0,97 1]
8	(5 9)	0	4	0,40	1 / 0,003	[ 1 1]
9	(6 8)	0	3	0,40	1 / 0,003	[ 1 1]
10	(7 10)	2	2	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
11	(7 11)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
12	(8 12)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
13	(8 13)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
14	(9 10)	0	0,7	0,40	1 / 0,003	[ 1 1]
15	(9 14)	2	0,3	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]
16	(10 15)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[ 1 0,97]

Номер по порядку (№ п.п. в табл. 1.1) удобно использовать в качестве индекса  $i$  трубопровода  $t_i$  или номера ребра  $e_{ij}$ .

## 1.2. Разбиение трубопроводной сети на аварийно-ремонтные зоны

Аварийно-ремонтная зона (АРЗ) – это часть трубопроводной сети. Для любой АРЗ справедливы высказывания:

- в случае возникновения аварии или необходимости проведения ремонтно-профилактических работ на любом трубопроводном участке зоны без доступа ЦП к месту работ все остальные трубопроводные участки и потребители этой зоны вынуждено отсекаются запорной арматурой от источника ЦП;

- АРЗ относительно любого своего трубопроводного участка является минимально возможной зоной, отсекаемой запорной арматурой от всей трубопроводной сети для гарантированного прекращения доступа ЦП от источника к этому участку;

- в процессе эксплуатации трубопроводной сети все потребители одной и той же зоны имеют равную возможность получать ЦП: в каждый период времени они все либо получают ЦП, либо не получают его;

- работоспособность конструктивных элементов (трубопроводных участков, колодцев, запорной арматуры и пр.) одной АРЗ не зависит от работоспособности конструктивных элементов других АРЗ.

Последнее высказывание никоим образом не касается запорной арматуры, перевод которой в состояние «закрыто» препятствует доступу ЦП в АРЗ. Такую запорную арматуру будем называть *отсекающей* или *существенной*. Термин «существенная» говорит о том, что соответствующая запорная арматура играет существенную роль в решении производственной задачи по прекращению доступа ЦП в одну из АРЗ и решении аналитической задачи по расчёту функциональной надёжности сети относительно потребителей этой же зоны.

Задание множества вершин  $\mathbf{V}$  (1.2), множества рёбер  $\mathbf{E}$  (1.3) и весовой функции  $z$  на множестве  $\mathbf{E}$  (1.4) позволяет произвести однозначное разбиение исходного графа сети  $\mathbf{G}$  (1.1) на подграфы функционально независимых АРЗ. Весовые функции  $l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$  не принимают участия в разбиении исходного графа  $\mathbf{G}$ . Таким образом, для решения задачи разбиения трубопроводной

сети на АРЗ достаточно задание взвешенного графа в усеченной форме

$$\mathbf{G}[z] = (\mathbf{V}, \mathbf{E}; z).$$

Разбиение исходного графа на подграфы АРЗ может производиться вручную или с помощью современных компьютерных технологий. В любом случае процедура разбиения соответствует алгоритму, приведенному на рис. 1.2.

Алгоритм разбиения начинается с ввода данных, определяющих математическую модель исходного графа трубопроводной сети (блок 2). Вводимые данные представляют собой двумерный массив  $\mathbf{E}$  размерности  $m \times 3$ , в котором задаются все рёбра графа и соответствующие им значения весовой функции  $z$ . Здесь  $m$  – общее количество рёбер в исходном графе сети. Так, для рассматриваемого примера содержимым массива  $\mathbf{E}$  являются данные из табл. 1.1, выделенные серым фоном.

Следующий блок 3 создаёт вспомогательный массив  $\Delta\mathbf{E}$ , заполняя его множеством всех рёбер исходного графа, и подготавливает (очищает) программный счётчик зон.

Блоки 4 – 10 организуют циклическую обработку исходных данных и вывод результатов обработки. При каждом выполнении цикла формируется подграф новой АРЗ, номер которой  $s$  определяется содержимым счётчика (блок 5). В блоке 6 из непустого массива  $\Delta\mathbf{E}$  выбирается произвольное ребро  $e_{pq}$ . Следующий блок 7 (процедура) из исходного графа  $\mathbf{G}$  выделяет  $s$ -й подграф  $\mathbf{G}_s$ , которому принадлежит ребро  $e_{pq}$ . Блок 8 фиксирует результаты циклической обработки: номер  $s$  очередной АРЗ и соответствующий этой зоне подграф  $\mathbf{G}_s$ . Конечный блок цикла 9 из вспомогательного массива  $\Delta\mathbf{E}$  удаляет все рёбра, принадлежащие подграфу  $\mathbf{G}_s$ . Циклическая обработка завершается, когда после формирования подграфа очередной АРЗ массив  $\Delta\mathbf{E}$  окажется пустым (блок 4).

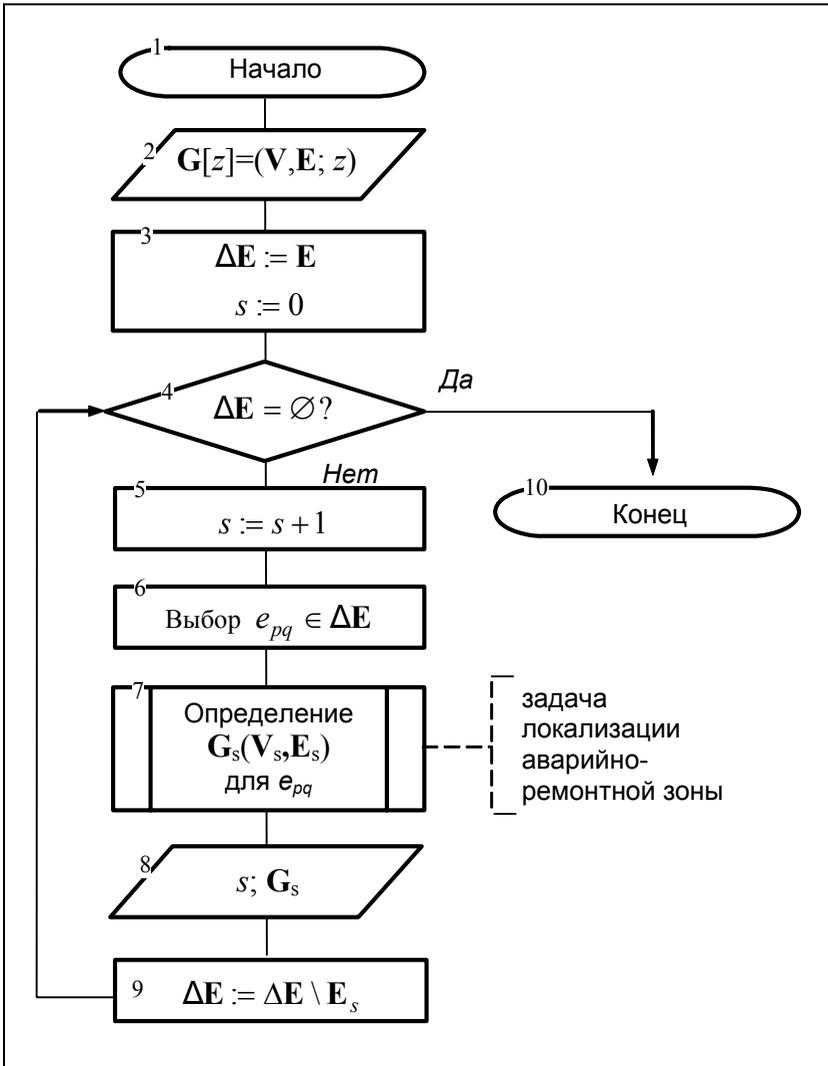


Рис.1.2 – Схема алгоритма разбиения исходного графа сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

Выход из цикла по критерию блока 4 приводит к завершению работы всего алгоритма. Номер последней зоны, определяемый программной переменной  $s$ , указывает на общее количество АРЗ в трубопроводной сети.

В трубопроводной сети, кроме отсекающей арматуры, может присутствовать *несущественная* запорная арматура, текущее положение которой «закрыто» или «открыто» не влияет на доступ ЦП в АРЗ. Примером такой арматуры может служить задвижка  $a_{\bar{c}}$  на рис. 1.1. Положение несущественной запорной арматуры влияет только на гидравлическое сопротивление трубопроводного участка, в котором она установлена.

В решении задачи «разбиения трубопроводной сети на АРЗ» конечный результат зависит только от существенной запорной арматуры. Во избежание ошибок, связанных с разбиением запорной арматуры на существенную и несущественную, необходимо, чтобы весовая функция  $z$  учитывала всю имеющуюся в сети запорную арматуру. Тогда корректное программное разбиение арматуры на существенную и несущественную производится автоматически в процессе циклического выполнения процедуры определения подграфа АРЗ  $\mathbf{G}_s[z]=\langle \mathbf{V}_s, \mathbf{E}_s; z \rangle$  для произвольно взятого ребра  $e_{pq}$  из множества рёбер  $\mathbf{E}$  (процедурный блок 7).

Определение подграфа АРЗ  $\mathbf{G}_s$  для произвольного ребра  $e_{pq}$  является ключевой процедурой в решении задачи разбиения исходного графа сети на АРЗ. Она заслуживает более подробного рассмотрения.

Каждое ребро  $e_{ij}$  исходного графа  $\mathbf{G}$  входит в несколько подграфов  $\mathbf{G}_r^{ij}$ ,  $r = \overline{1, m_{ij}}$ , которые могут быть отсечены от исходного графа с помощью различных комбинаций существенных задвижек. Здесь  $m_{ij}$  – общее число таких подграфов для ребра  $e_{ij}$ . Самый большой отсекаемый подграф – это исходный граф всей трубопроводной сети. По крайней мере, один из  $m_{ij}$  подгра-

фов, пусть таким подграфом  $\mathbf{G}_r^{ij}[z]$  ( $\mathbf{G}_r^{ij}[z] \subset \mathbf{G}[z]$ ) будет подграф  $\mathbf{G}_1[z] = (\mathbf{V}_1, \mathbf{E}_1; z_1)$ , имеет наименьшее число рёбер:

$$\text{card } \mathbf{E}_1 = \min_r \{ \text{card } \mathbf{E}_r \}, \quad r = \overline{1, m_{ij}}. \quad (1.6)$$

Именно подграф  $\mathbf{G}_1[z]$  является моделью искомой зоны, которой принадлежит трубопровод, соответствующий ребру  $e_{ij}$ . Общее количество различных минимальных подграфов типа  $\mathbf{G}_1[z]$  такое же, как и количество всех AP3 в сети. Для каждого минимального подграфа характерным является отсутствие существенной запорной арматуры внутри AP3. Только несущественная запорная арматура может находиться внутри AP3, и только внутри.

Задача локализации AP3 для конкретного трубопровода формулируется следующим образом.

Дана математическая модель трубопроводной сети в виде связанного взвешенного графа  $\mathbf{G}[z] = (\mathbf{V}, \mathbf{E}; z)$  и указано ребро  $e_{ij} \in \mathbf{E}$ , соответствующее трубопроводному участку, для которого следует определить аварийно-ремонтную зону.

Требуется из всех подграфов  $\mathbf{G}_g^{ij}[z]$ ,  $g = \overline{1, m_{ij}}$ , включающих ребро  $e_{ij}$ , входящих в исходный граф  $\mathbf{G}[z]$  и граничащих с остальной частью графа  $\mathbf{G}[z] \setminus \mathbf{G}_g^{ij}[z]$  только посредством существенной запорной арматуры, найти подграф  $\mathbf{G}_1[z] = (\mathbf{V}_1, \mathbf{E}_1; z_1)$ , удовлетворяющий критерию  $\text{card } \mathbf{E}_1 = \min_r \{ \text{card } \mathbf{E}_g \}$ ,  $g = \overline{1, m_{ij}}$ , где  $m_{ij}$  – общее число подграфов  $\mathbf{G}_g^{ij}[z]$ .

Теоретически решение данной задачи может быть получено путем прямого перебора всех возможных комбинаций рёбер, об-

разующих связные подграфы и включающие ребро  $e_{ij}$ , с проверкой для каждой комбинации выполнения требований задачи. Однако практически такой способ неэффективен из-за астрономического числа возможных комбинаций.

Решение задачи локализации АРЗ для произвольно взятого ребра  $e_{pq}$  из множества  $\mathbf{E}$ , минуя прямой перебор, можно получить с помощью рекурсивного алгоритма, предложенного Самойленко Н.И. в [35], если исходный граф сети преобразовать в ориентированный граф. При этом каждое ребро  $e_{ij}$  в исходном графе заменяется дугой  $e_{ij}$ , направленной от вершины  $v_i$  к вершине  $v_j$ . Данный алгоритм оперирует только рёбрами графа сети, которые непосредственно сопрягаются с указанным ребром  $e_{pq}$ , рекурсивно наращивая его до подграфа, гарантированно удовлетворяющего критерию (1.6). Это позволяет исключить из решения задачи подавляющее число рёбер, а само решение сделать компактным, наглядным и простым, особенно при отслеживании решения с помощью компьютерной графики, например, в графической среде AutoCAD.

Рекурсивный алгоритм локализации АРЗ соответствует вычислимой функции

$$f(e_{pq}) = \begin{cases} \mathbf{G}_0, & \text{если } z_{pq} = 3; \\ R(\mathbf{G}_0, v_p), & \text{если } z_{pq} = 2; \\ R(\mathbf{G}_0, v_q), & \text{если } z_{pq} = 1; \\ R(R(\mathbf{G}_0, v_p), v_q), & \text{если } z_{pq} = 0, \end{cases} \quad (1.7)$$

где

$$\forall e_{pq} \in \mathbf{E}, \quad \mathbf{E}_0 = \{e_{pq}\}, \quad \mathbf{V}_0 = \{v_p, v_q\}, \quad \mathbf{G}_0 = (\mathbf{V}_0, \mathbf{E}_0); \quad (1.8)$$

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1, \end{cases} \quad (1.9)$$

$$Q(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^- \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij}, & \text{если } z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+ \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^-; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \cup R(\mathbf{G}_1, v_s \mid v_s \in \{v_i, v_j\}, v_s \neq v_r), & \\ & \text{если } z_{ij} = 0. \end{cases} \quad (1.10)$$

Здесь  $\mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \Leftrightarrow (\mathbf{V}_1 \cup \{v_r\}, \mathbf{E}_1 \cup e_{ij})$  при условии  $i = r \vee j = r$ ;  $\mathbf{E}_r^-$  – множество дуг, исходящих из вершины  $v_r$ ,  $\mathbf{E}_r^- \subseteq \{e_{rj} \mid e_{rj} \in \mathbf{E}\}$ ;  $\mathbf{E}_r^+$  – множество дуг, входящих в вершину  $v_r$ .  $\mathbf{E}_r^+ \subseteq \{e_{rj} \mid e_{rj} \in \mathbf{E}\}$ ;  $r = \overline{1, n}$ .

В рамках принятых в (1.10) обозначений объединение множеств исходящих и входящих дуг  $\mathbf{E}_r^- \cup \mathbf{E}_r^+$  представляет собой

множество дуг  $\mathbf{E}_r$ , инцидентных  $r$ -й вершине, а объединение

$\bigcup_{k=1}^n \mathbf{E}_k$  определяет множество  $\mathbf{E}$  всех дуг графа сети.

В сложной трубопроводной сети при высокой связности исходного графа рекурсивная обработка может вернуться в вершину, которая уже была обработана. При этом повторная циклическая обработка в (1.9) теряет смысл, хотя и не влияет на конечный результат. Чтобы аннулировать и тем самым уменьшить глубину рекурсии, необходимо модифицировать условие (1.9) следующим образом:

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1. \end{cases} \quad (1.11)$$

Модификация (1.11) позволяет существенно сократить время работы программы, реализующей алгоритм разбиения, и уменьшить потребность в динамической памяти компьютера при её выполнении.

Выражения (1.7) – (1.11) представляют собой математическую модель процесса разбиения графа сети на подграфы АРЗ.

Решение задачи локализации АРЗ в графической среде *AutoCAD* позволяет визуально наблюдать процесс разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ.

Применительно к рассматриваемому примеру алгоритм разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ приводит к результатам, приведенным на рис. 1.3 и отраженным в табл. 1.2.

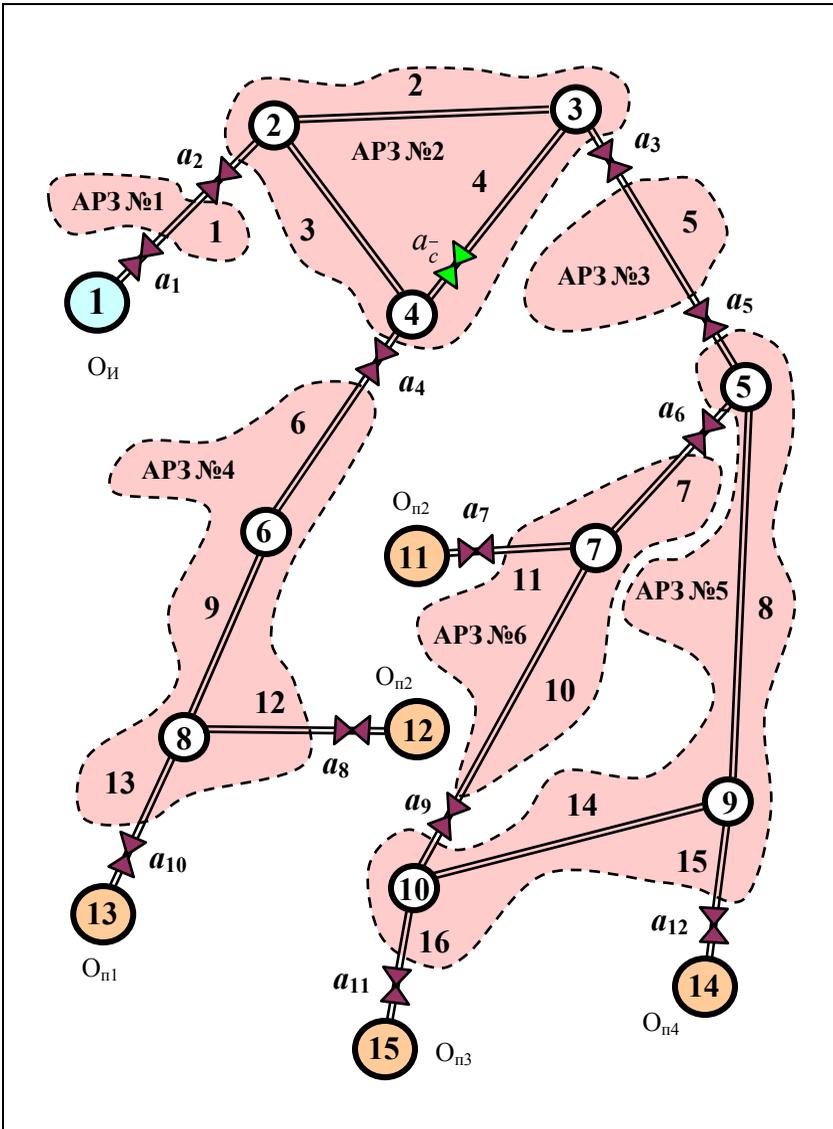


Рис.1.3 – Разбиение исходного графа трубопроводной транспортной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

Таблица 1.2

Результаты разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ

№ под- графа (АРЗ)	Элементы подграфа (АРЗ)		
	Рёбра подграфа (тру- бопроводные участки)	Отсекающие задвигки	Вершины под- графа (колодцы)
1	$e_{1,2}$ ( $t_1$ )	$a_1, a_2$	—
2	$e_{2,3}, e_{2,4}, e_{3,4}$ ( $t_2, t_3, t_4$ )	$a_2, a_3, a_4$	2, 3, 4
3	$e_{3,5}$ ( $t_5$ )	$a_3, a_5$	—
4	$e_{4,6}, e_{6,8}, e_{8,12}, e_{8,13}$ ( $t_6, t_9, t_{12}, t_{13}$ )	$a_4, a_8, a_{10}$	6, 8
5	$e_{5,9}, e_{9,10}, e_{9,14}, e_{10,15}$ ( $t_8, t_{14}, t_{15}, t_{16}$ )	$a_5, a_6, a_9, a_{11}, a_{12}$	5, 9, 10
6	$e_{5,7}, e_{7,10}, e_{7,11}$ ( $t_7, t_{10}, t_{11}$ )	$a_6, a_7, a_9$	7

Результаты разбиения указывают на такие особенности трубопроводной сети:

- сеть состоит из шести аварийно-ремонтных зон;
- задвигки  $a_j, j = \overline{1,12}$ , являются существенными (отсекающими);
- задвижка  $a_c^-$  в АРЗ № 2 является несущественной;
- потребитель  $O_{п2}$ , которому в исходном графе сети соответствуют вершины 11 и 12, получает ЦП из двух АРЗ (№4 и №6);
- выход из строя АРЗ №1 или №2 приводит к прерыванию поставок ЦП всем потребителям;

- выход из строя АРЗ №3 или №5 приводит к прерыванию поставок ЦП потребителям  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$ ;
- выход из строя АРЗ №4 приводит к прерыванию поставок ЦП потребителю  $O_{п1}$ ;
- выход из строя АРЗ №6 не приводит к прерыванию поставок ЦП потребителям.

Разбиение исходного графа сети на подграфы АРЗ позволяет определить ремонтноприспособленность АРЗ и всей сети в целом. Так в условиях рассматриваемого примера только АРЗ №6 обладает ремонтноприспособленностью, т.е. проведение аварийно-ремонтных или профилактических работ в этой зоне не приводит к прерыванию поставок ЦП в системе хотя бы одному потребителю. Выход же из строя любой другой АРЗ нарушает непрерывность поставок ЦП, по крайней мере, одному потребителю. Следовательно, вся сеть не обладает ремонтноприспособленностью.

### **1.3. Расчет технической надежности аварийно-ремонтной зоны как независимого макроэлемента в структуре трубопроводной системы**

Техническое состояние аварийно-ремонтной зоны не зависит от технического состояния конструктивных элементов других зон. Выход из строя *любого* элемента одной зоны не влечёт за собой выхода из строя какой-либо другой зоны или какого-либо конструктивного элемента, принадлежащего другим зонам. Поэтому любая АРЗ может рассматриваться как независимый макроэлемент в трубопроводной структуре транспортной сети, состоящий из микроэлементов (запорной арматуры, трубопроводов, колодцев и пр.) и наследующий свойства своих микроэлементов. Если какой-либо микроэлемент переходит в состояние «неисправный», то и соответствующий макроэлемент также переходит в состояние «неисправный». Техническое состояние АРЗ зависит только от технического состояния конструктивных элементов, входящих в состав этой АРЗ, и только этой. При этом техническое состояние АРЗ никоим образом не зависит от того, как микроэлементы объединяются в макроэлемент, т.е. не зависят от топологической

структуры АРЗ. В дальнейшем, структуру АРЗ будем называть микроструктурой.

Функционирование же всей трубопроводной сети зависит не только от технического состояния каждой АРЗ, но и от топологической структуры, объединяющей все АРЗ в единую трубопроводную транспортную сеть. В дальнейшем, топологическую структуру сети на уровне АРЗ будем называть макроструктурой. Решение функциональной задачи ТТС (непрерывная поставка ЦП) по отношению к каждому конкретному потребителю и по отношению ко всем потребителям вместе будет зависеть от технического состояния каждой АРЗ и от того, как АРЗ стыкуются между собой, т.е. от макроструктуры сети.

Из сказанного следуют выводы:

– техническая надёжность АРЗ зависит от состава и технической надёжности её конструктивных элементов и не зависит от её структуры (микроструктуры);

– функциональная надёжность сети зависит от макроструктуры сети, состава АРЗ (макроэлементов) и технической надёжности каждой АРЗ;

– функциональная надёжность сети не зависит от внутренней микроструктуры АРЗ.

Таким образом, для расчёта функциональной надёжности необходимо предварительно рассчитать техническую надёжность всех АРЗ трубопроводной сети.

Как было отмечено ранее, АРЗ считается работоспособной, если работоспособны все её элементы. Это значит, что технической надёжности АРЗ соответствует последовательная модель надёжности технических систем (рис. 1.4).

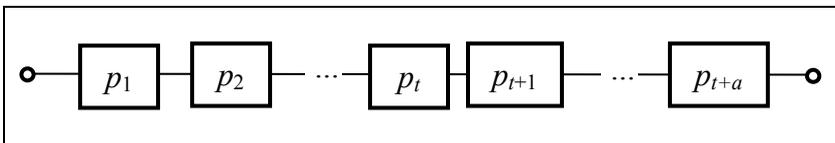


Рис. 1.4 – Последовательная модель технической надёжности АРЗ

На рис. 1.4 последовательная модель технической надёжности АРЗ включает надёжности всех трубопроводов  $p_1, p_2, \dots, p_t$  и несущественных задвижек  $p_{t+1}, p_{t+2}, \dots, p_{t+a}$ . Здесь  $t$  – общее количество трубопроводов в АРЗ,  $a$  – количество несущественных задвижек в зоне. Техническая надёжность всей зоны  $P_Z$  в этом случае определяется по формуле

$$P_Z = \left( \prod_{i=1}^t p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t+a} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t+a} p_i. \quad (1.12)$$

Структура АРЗ может иметь самую разную конфигурацию, но как бы трубопроводы и несущественные задвижки не объединялись в единую АРЗ, модель надёжности (1.12) этой зоны будет оставаться одной и той же.

Использование формулы (1.12) предполагает наличие вероятностей безотказной работы всех элементов зоны. Эти вероятности могут быть получены для задвижек на основании паспортных данных устройства с учётом времени эксплуатации. Для трубопроводных участков вероятность их безотказной работы определяется как разность между единицей и относительным временем нахождения этих участков в неработоспособном состоянии на основании накопленных статистических данных либо на основании данных, представленных в табл. 1.1, с помощью формулы

$$p_i = 1 - \frac{\lambda_i l_i}{\mu_i}, \quad i = \overline{1, t}, \quad (1.13)$$

где  $t$  – количество трубопроводных участков в АРЗ;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов, определяемая как количество отказов в течение года на 1 км трубы с параметрами (толщина стенок, диаметр, материал, срок эксплуатации), соответствующими параметрам  $i$ -го трубопроводного участка,  $\text{км}^{-1} \text{год}^{-1}$ ;  $\mu_i$  – интенсивность восстановления неисправностей, определяемая как величина, об-

Расчёт функциональной надёжности

ратная времени устранения одной неисправности на трубопроводе  $i$ -го типа, год<sup>-1</sup>;  $l_i$  – длина  $i$ -го трубопроводного участка, км.

Рассчитаем техническую надёжность всех АРЗ трубопроводной сети, заданной условием рассматриваемого примера.

Для расчёта технической надёжности предварительно преобразуем табл. 1.1 в табл. 1.3, воспользовавшись формулой (1.13).

Таблица 1.3  
Надёжность конструктивных элементов трубопроводной сети

Индекс трубопроводного участка	Индекс АРЗ	Надёжность	
		$p_i$	$\mathbf{p}^T(e_{ij})$
1	1	0,9800	[ 0,99 0,98]
2	2	0,9854	[ 1 1]
3	2	0,9873	[ 1 1]
4	2	0,9891	[ 1 0,98]
5	3	0,9873	[ 0,98 0,97]
6	4	0,9909	[ 0,98 1]
7	6	0,9952	[ 0,97 1]
8	5	0,9952	[ 1 1]
9	4	0,9964	[ 1 1]
10	6	0,9976	[ 1 0,97]
11	6	0,9995	[ 1 0,97]
12	4	0,9995	[ 1 0,97]
13	4	0,9994	[ 1 0,97]
14	5	0,9992	[ 1 1]
15	5	0,9996	[ 1 0,97]
16	5	0,9994	[ 1 0,97]

Таблица в формате табл. 1.1 удобна для представления исходных данных для проектируемых сетей, когда отсутствует возможность статистической оценки надёжности работы различных элементов сети.

Таблица же в формате табл. 1.3 удобна для представления исходных данных для действующих сетей, когда надёжность каждого его элемента определяется на основе накопленных данных о состоянии этого элемента в процессе эксплуатации.

В табл. 1.3 серым фоном выделены данные, которые участвуют в определении технической надёжности различных АРЗ.

Технические надёжности аварийно-ремонтных зон в соответствии с формулой (1.12) при сохранении для  $p_i$  индексации, используемой в табл. 1.3, определяются следующим образом:

– для АРЗ №1  $P_{Z1} = p_1 = 0,98$ ;

– для АРЗ №2  $P_{Z2} = p_2 p_3 p_4 p_c^- = 0,943$  ( $p_c^- = 0,98$  – надёжность несущественной задвижки  $a_c^-$ );

– для АРЗ №3  $P_{Z3} = p_5 = 0,9873$ ;

– для АРЗ №4  $P_{Z4} = p_6 p_9 p_{12} p_{13} = 0,9863$ ;

– для АРЗ №5  $P_{Z5} = p_8 p_{14} p_{15} p_{16} = 0,9934$ ;

– для АРЗ №6  $P_{Z6} = p_7 p_{10} p_{11} = 0,9923$ .

#### **1.4. Преобразование исходного графа сети в макрограф АРЗ**

Четвертый этап метода АРЗ предполагает преобразование исходного взвешенного графа  $\mathbf{G}[z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}]$  транспортной сети в новый взвешенный макрограф АРЗ

$$Z[p, p_a] = (Vz, Ez; p, p_a). \quad (1.14)$$

Здесь  $Vz$  – множество вершин макрографа, соответствующих аварийно-ремонтным зонам сети;  $Ez$  – множество рёбер макрографа, определяющих топологические связи между АРЗ;  $p$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая техническую надёжность соответствующей АРЗ;  $p_a$  – весовая функция на рёбрах графа, определяющая техническую надёжность задвижек, соответствующих этим рёбрам.

Мощность множества  $Vz$  определяется общим количеством АРЗ в сети. Мощность множества  $Ez$  определяется общим количеством отсекающих задвижек, и только отсекающих. Несущественные задвижки никоим образом не влияют на структуру макрографа АРЗ.

Четвёртый этап позволяет устранить из исходного графа сети всю графическую информацию, не имеющую отношение к расчёту функциональной надёжности, а пять весовых функций заменить двумя.

Два предыдущих этапа подготавливают исходные данные для процедуры построения взвешенного макрографа АРЗ. Так, 2-й этап (разбиение исходного графа на подграфы АРЗ) определяет состав и структуру макрографа, а 3-й этап (расчёт технической надёжности АРЗ) определяет весовую функцию  $p$ . Весовая функция  $p_a$  макрографа АРЗ извлекается из весовой функции  $p$  исходного графа.

Вершины исходного графа, соответствующие источнику ЦП и потребителям, сохраняют своё назначение и положение в макрографе АРЗ.

В условиях рассматриваемого примера макрограф АРЗ имеет вид, изображенный на рис. 1.5.

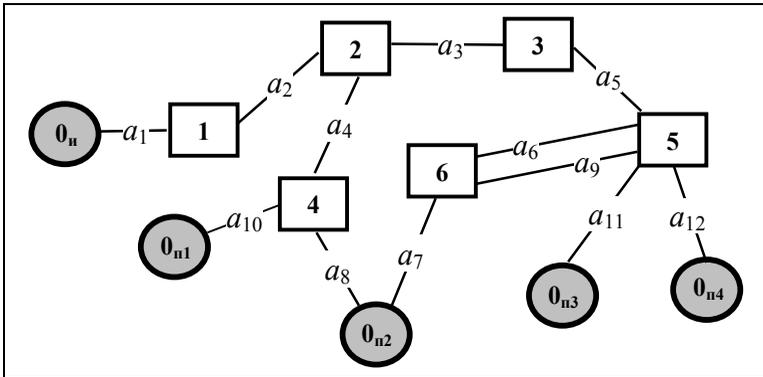


Рис. 1.5 – Макрограф аварийно-ремонтных зон

Весовая функция  $p$  макрографа  $Z[p, p_a]$  соответствует табл. 1.4.

Таблица 1.4

Весовая функция  $p$  на вершинах графа АРЗ

	Номер вершины (№ АРЗ)					
	1	2	3	4	5	6
Весовая функция $p$	0,98	0,943	0,9873	0,9863	0,9934	0,9923

Весовая функция  $p_a$  макрографа  $Z[p, p_a]$  соответствует табл. 1.5.

Таблица 1.5

Весовая функция  $p_a$  на рёбрах графа АРЗ

	Задвижка ребро											
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$
Весовая функция $p_a$	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Макрограф АРЗ является удобным и наглядным средством для выражения общей структуры ТТС. Он показывает, каким образом и с помощью какой запорной арматуры аварийно-ремонтные зоны стыкуются между собой, с источником ЦП и потребителями. Но самое главное – он содержит в полном объёме всю полезную информацию, необходимую для расчёта функциональной надёжности системы относительно любого потребителя сети.

Граф на рис. 1.5 допускает упрощение. Задвижки  $a_6$  и  $a_9$ , соединяющие зоны №5 и №6, несут одинаковую функциональную нагрузку. Если хотя бы одна из зон №5 и №6 пребывает в аварийном состоянии, то обе задвижки  $a_6$  и  $a_9$  должны находиться в положении «закрыто». Если обе зоны №5 и №6 пребывают в исправном состоянии, то обе задвижки должны находиться в рабочем состоянии «открыто». Поэтому параллельные рёбра, соединяющие в макрографе АРЗ вершины 5 и 6, можно заменить одним обобщенным ребром. Этому ребру будет соответствовать обобщенная задвижка с технической надёжностью  $p_{a_{6,9}} = p_{a_6} \cdot p_{a_9} = 0,9409$ .

Последовательный тип модели технической надёжности обобщенной задвижки объясняется тем, что отсекающие задвижки в параллельных ребрах отвечают своему назначению только тогда, когда они все одновременно исправны.

Весовая функция  $p_a$  упрощенного макрографа АРЗ в условиях рассматриваемого примера соответствует табл. 1.6.

Таблица 1.6

Весовая функция  $p_a$  на рёбрах графа АРЗ

	Ребро– задвижка										
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_{6,9}$	$a_7$	$a_8$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$
Весовая функция $p_a$	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,9409	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Анализ макрографа АРЗ позволяет выявить особенности сети, играющие существенную роль в выполнении очередного этапа расчёта функциональной надёжности. В условиях рассматриваемого примера такими особенностями являются:

- только одна АРЗ №1 стыкуется непосредственно с источником;
- потребитель  $O_{п2}$  получает ЦП из двух АРЗ ( №4 и №6);
- каждый из потребителей  $O_{п1}$ ,  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$  получает ЦП только из одной аварийно-ремонтной зоны (соответственно, АРЗ №4, №5 и №5);
- потребители  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$  получают ЦП из одной и той же АРЗ (№5).

### **1.5. Построение упрощенного макрографа АРЗ сети относительно конкретного потребителя**

Как правило, поставка ЦП конкретному потребителю трубопроводной сети зависит не от всех АРЗ. Так, поставки ЦП потребителям зон, непосредственно стыкующихся с источником ЦП, зависят только от надёжности этих зон и не зависят от остальных.

В общем случае, если ни один маршрут транспортирования ЦП от источника к конкретному потребителю не включает какую-либо зону сети, то работоспособность этой зоны не влияет на функциональную надёжность сети относительно данного потребителя. Данное обстоятельство позволяет упростить макрограф АРЗ для расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей. Упрощение макрографа АРЗ относительно конкретного потребителя соответственно упрощает анализ макрографа АРЗ на предмет построения расчётной модели для функциональной надёжности сети относительно данного потребителя.

В условиях рассматриваемого примера упрощенный макрограф АРЗ относительно потребителя  $O_{п1}$  показан на рис. 1.6.

## Расчёт функциональной надёжности

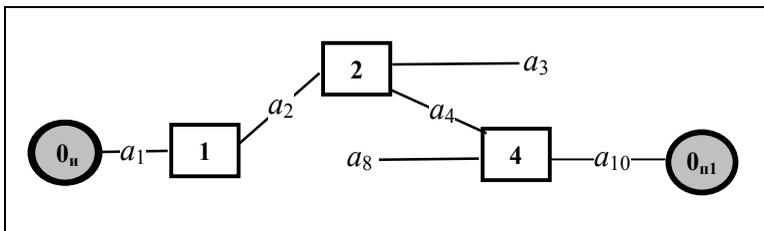
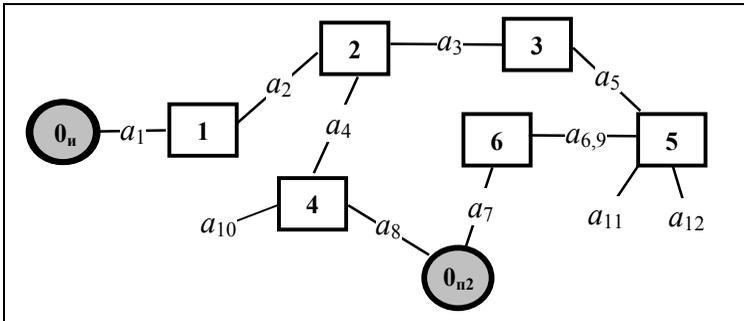
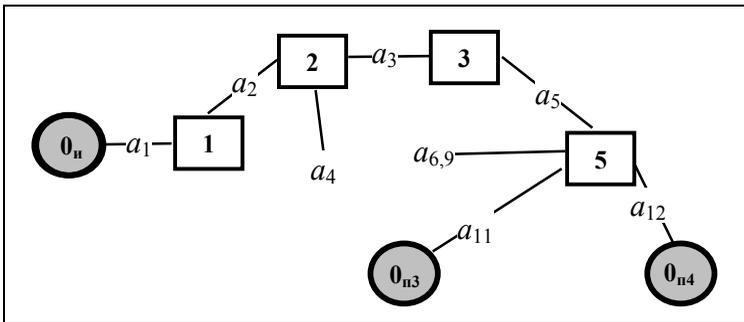


Рис. 1.6 – Упрощенный макрограф AP3 относительно потребителя  $O_{n1}$

Все конструктивные элементы сети, соответствующие элементам графа на рис. 1.6, влияют на функциональную надёжность сети относительно потребителя  $O_{n1}$ . Так, при неработоспособности любой из зон №1, №2 и №4 транспортирование ЦП к потребителю становится невозможным. В свою очередь, выход из строя любой из задвижек  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_8, a_{10}$  приводит к неработоспособности одной из зон №1, №2, №4. Работоспособность остальных зон (№3, №5, №6) и задвижек ( $a_5, a_6, a_7, a_9, a_{11}, a_{12}$ ) на транспортирование ЦП к потребителю  $O_{n1}$  не влияют, так как могут быть отсечены от маршрутов транспортирования ЦП работоспособной задвижкой  $a_3$ .

Потребитель  $O_{n2}$  с целью повышения надёжности поставки имеет возможность получать ЦП из двух зон (№4 и №6). Макрограф AP3 относительно потребителя  $O_{n2}$  показан на рис. 1.7. Как следует из структуры макрографа, все AP3 и отсекающие задвижки сети оказывают влияние на транспортирование ЦП к потребителю  $O_{n2}$ .

Потребители  $O_{n3}$  и  $O_{n4}$  получают ЦП из одной зоны №5. Поэтому данным потребителям соответствует один упрощенный макрограф AP3, который показан на рис. 1.8.

Рис. 1.7 – Упрощённый макрограф AP3 относительно потребителя  $O_{n2}$ Рис. 1.8 – Упрощённый макрограф AP3 относительно потребителей  $O_{n3}$  и  $O_{n4}$ 

Как следует из рис. 1.8, зоны №4 и №6 и задвижки  $a_7$ ,  $a_8$ ,  $a_{10}$  в упрощённом макрографе не фигурируют, а значит – на функциональную надёжность сети относительно потребителей  $O_{n3}$  и  $O_{n4}$  они никакого влияния не оказывают.

Все упрощённые графы AP3 содержат лишь полезную информацию для расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей, что значительно облегчает проведение последующих двух этапов.

## 1.6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя

Расчётная модель функциональной надёжности трубопроводной сети для каждого конкретного потребителя строится на основе упрощённого макрографа АРЗ относительно данного потребителя.

Расчётная модель наследует структуру упрощённого графа. При этом вершины, соответствующие зонам, и рёбра, соответствующие отсекающим задвижкам, заменяются блоками с указанием технической надёжности соответствующих элементов трубопроводной транспортной сети.

На рис. 1.9 приведены расчётные модели для всех потребителей трубопроводной транспортной сети в условиях рассматриваемого примера.

Последовательная модель надёжности для потребителя  $O_{п1}$  (рис. 1.9,а) объясняется тем, что выход из строя любой задвижки или АРЗ, обозначения которых фигурируют на усечённом графе АРЗ (рис. 1.6), приводит к прекращению транспортирования ЦП потребителю  $O_{п1}$ . Только одновременная безотказная работа всех этих элементов позволяет системе отвечать своему назначению относительно потребителя  $O_{п1}$ .

Потребителю  $O_{п2}$  транспортирование ЦП осуществляется по двум маршрутам. Потребитель будет получать ЦП, если при одновременной работоспособности всех элементов цепочки « $a_1 + \text{АРЗ №1} + a_2 + \text{АРЗ №2} + a_3 + a_4$ » будет работоспособна хотя бы одна из цепочек элементов: « $\text{АРЗ №4} + a_8 + a_{10}$ » или « $\text{АРЗ №3} + a_5 + \text{АРЗ №5} + a_{11} + a_{12} + a_{6,9} + \text{АРЗ №6} + a_7$ ». Только одновременный выход из строя обеих цепочек приводит к вынужденному прекращению подачи ЦП потребителю. Поэтому данным цепочкам соответствует параллельная модель надёжности, которая затем уже последовательно соединяется с первой цепочкой (рис. 1.9,б).

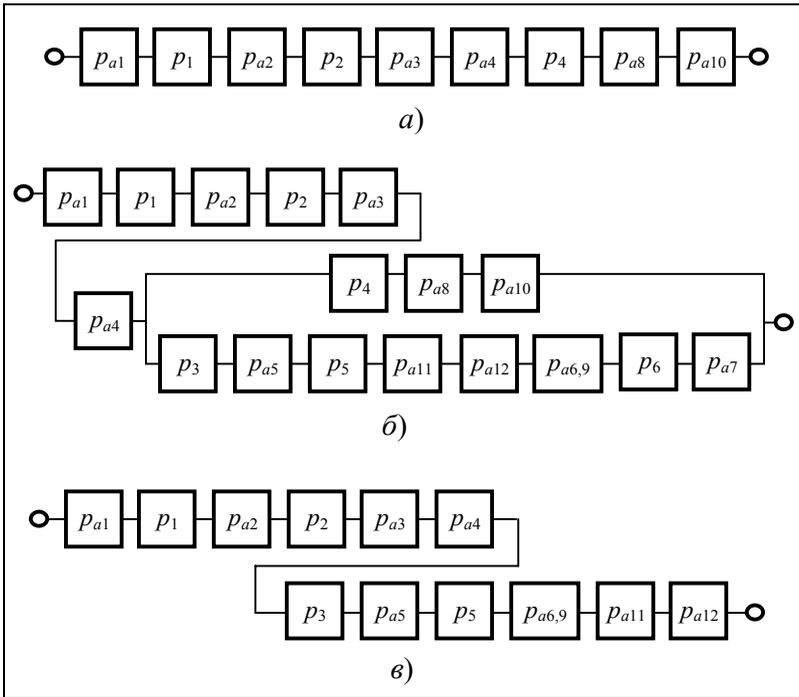


Рис. 1.9 – Расчетные модели функциональной надёжности

Потребителям  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$  соответствует одна и та же расчётная модель (рис. 1.9,в). Как и в случае с потребителем  $O_{п1}$ , им соответствует последовательная модель надёжности. Объясняется это тем, что выход из строя любой задвижки или АРЗ, обозначения которых фигурируют на усечённом графе АРЗ (рис. 1.8), приводит к прекращению транспортирования ЦП потребителям  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$ . Только одновременная безотказная работа всех этих элементов позволяет системе отвечать своему назначению относительно потребителей  $O_{п3}$  и  $O_{п4}$ .

### 1.7. Математическая модель функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя

Получение математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя осуществляется на основе расчётных моделей с помощью классических методов теории надёжности технических систем.

Математическая модель формируется для каждого потребителя  $O_k$  трубопроводной системы,  $k \in \{1, \overline{\Pi}\}$ . Здесь  $\Pi$  – общее количество потребителей. Если несколько потребителей получают ЦП только из одной зоны, то соответствующие им математические модели функциональной надёжности совпадают.

Для формирования математической модели функциональной надёжности относительно потребителя  $O_k$  используются следующие исходные данные:

- расчётная модель функциональной надёжности относительно потребителя  $O_k$ ;
- весовая функция  $p$  на вершинах макрографа АРЗ, определяющая техническую надёжность каждой АРЗ сети;
- весовая функция  $p_a$  на рёбрах макрографа АРЗ, определяющая техническую надёжность запорной арматуры всей сети.

Если расчётная модель функциональной надёжности для произвольно взятого потребителя  $O_k$  состоит только из последовательно и параллельно соединённых элементов (нет мостовых соединений), то процесс формирования математической модели соответствует алгоритму, приведенному на рис. 1.10.

Как следует из алгоритма, формирование математической модели функциональной надёжности сети относительно потребителя  $O_k$  представляет собой циклический процесс замены в расчётной модели участков  $U[p]$  с однотипным соединением элементов одним элементом с эквивалентной надёжностью.

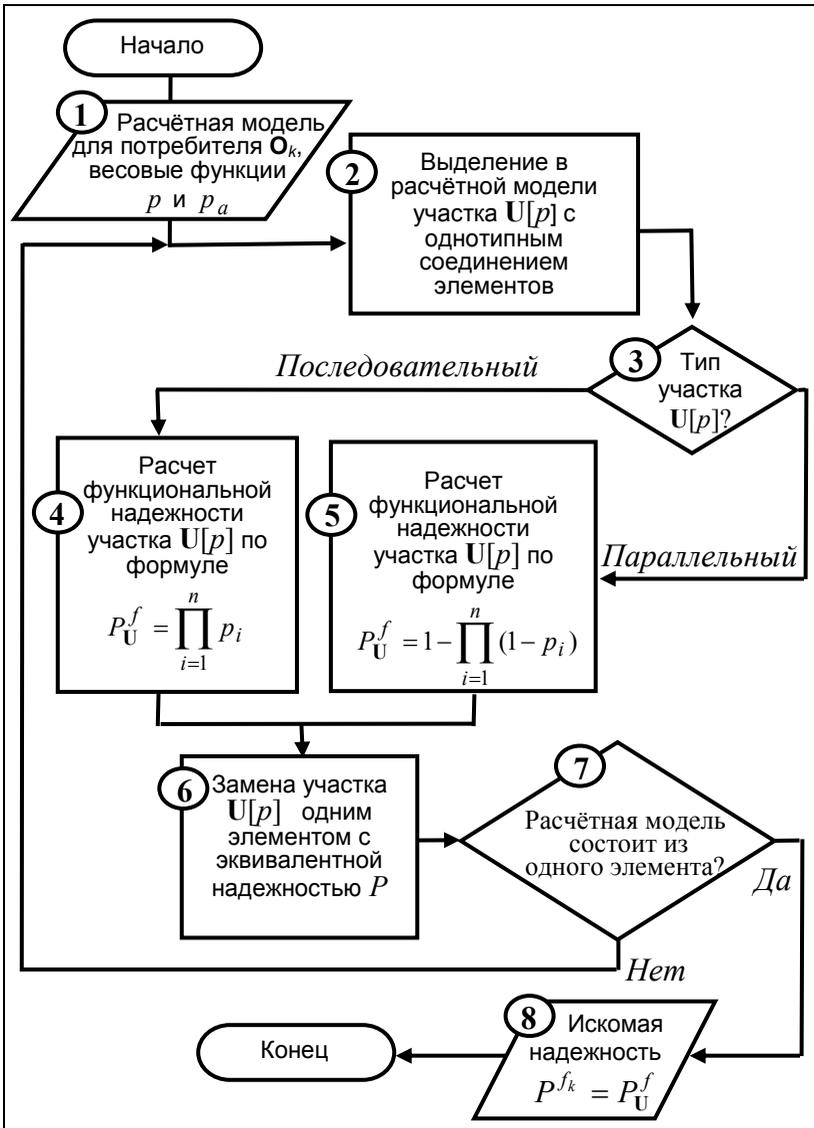


Рис. 1.10 – Схема алгоритма построения математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя

Расчёт функциональной надёжности

Эквивалентная надёжность рассчитывается по формуле

$$P_U^f = \prod_{i=1}^n p_i \quad (\text{в случае последовательного соединения элементов})$$

или по формуле  $P_U^f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$  (в случае параллельного соединения элементов). Здесь  $n$  – количество элементов в однотипном участке;  $p_i$  – вероятность безотказной работы конструктивного элемента трубопроводной транспортной сети, соответствующего  $i$ -му элементу участка. Значение  $p_i$  выбирается согласно весовым функциям  $p$  и  $p_a$  макрографа АРЗ.

Циклический процесс замены продолжается до тех пор, пока расчётная модель не будет состоять только из одного элемента. Расчетная формула надёжности  $P_U^f$  этого элемента и будет являться искомой математической моделью функциональной надёжности сети относительно  $k$ -го потребителя системы:

$$P^{f_k} = P_U^f, \quad k = \overline{1, \Pi}.$$

Здесь  $\Pi$  – общее количество потребителей в трубопроводной сети.

Величина  $P^{f_k}$  показывает, с какой вероятностью трубопроводная сеть обеспечивает поступление ЦП от источника к  $k$ -му потребителю системы в течение определённого периода времени (как правило, один год).

В условиях рассматриваемого примера исходными данными являются:

- расчётные модели функциональной надёжности, представленные на рис. 1.9;
- весовая функция  $p$  на вершинах макрографа АРЗ, представленная с помощью табл. 1.4;

– весовая функция  $p_a$  на рёбрах макрографа АРЗ, представленная с помощью табл. 1.6.

Работа алгоритма построения математических моделей для рассматриваемого примера даёт следующие результаты (сгенерированные математические модели):

– для потребителя  $\mathbf{O}_1$

$$P^{f_1} = p_{a1}p_1p_{a2}p_2p_{a3}p_{a4}p_4p_{a8}p_{a10}; \quad (1.15)$$

– для потребителя  $\mathbf{O}_2$

$$P^{f_2} = p_{a1}p_1p_{a2}p_2p_{a3}p_{a4} \times \\ \times \left[ 1 - (1 - p_4p_{a8}p_{a10})(1 - p_3p_{a5}p_5p_{a6,9}p_6p_{a7}p_{a11}p_{a12}) \right]; \quad (1.16)$$

– для потребителей  $\mathbf{O}_3$  и  $\mathbf{O}_4$

$$P^{f_3} = P^{f_4} = p_{a1}p_1p_{a2}p_2p_{a3}p_{a4}p_3p_{a5}p_5p_{a6,9}p_{a11}p_{a12}. \quad (1.17)$$

Здесь  $p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{a12}$  – значения весовой функции  $p_a$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_6$  – значения весовой функции  $p$ .

Расчёты функциональной надёжности по математическим моделям (1.15) – (1.17) дают следующие искомые значения:

$$P^{f_1} = 0,8374; \quad P^{f_2} = 0,8876; \quad P^{f_3} = P^{f_4} = 0,7532.$$

Результаты расчёта свидетельствуют, что потребитель  $\mathbf{O}_2$ , обеспечивается целевым продуктом с наивысшей надёжностью. Этому способствует резервирование маршрута транспортировки ЦП, обусловленное двойным подключением потребителя к трубопроводной сети: через АРЗ №4 и через АРЗ №6.

\* \* \*

Изложение теоретических основ метода АРЗ и его параллельная иллюстрация на конкретном примере касались трубопроводной транспортной системы с одним источником ЦП. Использование метода АРЗ в случае двух и более источников ЦП не имеет никаких принципиальных отличий: и последовательность этапов расчёта функциональной надёжности, и их основное содержание остаются прежними.

Отметим несущественные отличия в применении метода АРЗ для систем трубопроводного транспорта с несколькими источниками. Так, на 1-м этапе в задании исходного взвешенного графа сети будет присутствовать не одна, а несколько вершин, каждая из которых соответствует определённому источнику ЦП.

На 4-м и 5-м этапах основной макрограф АРЗ и все упрощённые графы АРЗ будут наследовать все вершины исходного графа сети, соответствующие источникам. При этом упрощённый граф АРЗ для конкретного потребителя должен включать все альтернативные маршруты транспортирования ЦП от всех источников к данному потребителю.

Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя (6-й этап) будет начинаться из одной точки, одновременно принадлежащей всем источникам ЦП, образуя таким образом параллельную модель надёжности, каждая ветвь которой соответствует определённому источнику.

Содержание 2-го, 3-го и 7-го этапов остаётся без изменений.

## РАЗДЕЛ 2

### **АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ**

Метод АРЗ позволяет решать очень важную задачу по определению вероятности непрерывной поставки целевого продукта конкретному потребителю. Данный метод положен в основу разрабатываемой теории функциональной надёжности трубопроводных систем, в которой фигурируют несколько различных показателей функциональной надёжности. Метод АРЗ является основной научной предпосылкой для проведения ряда новых исследований в области трубопроводных систем.

Основные этапы метода были разработаны и претерпели значительную модификацию в течение 2007 – 2009 г.г. Поскольку метод претендует на доминирующую роль в становлении теории функциональной надёжности трубопроводных систем, а также на широкое внедрение в процессы эксплуатации, проектирования и развития трубопроводных систем различного назначения, то он должен обязательно пройти проверку на адекватность.

В последующих двух разделах настоящей монографии рассматриваются вопросы организации и проведения вычислительного эксперимента по проверке адекватности метода АРЗ и математических моделей, построенных с его помощью.

#### **2.1. Цели проверки адекватности и пути их достижения**

Аналитические методы построения математических моделей для расчёта показателей функциональной надёжности наиболее эффективны при проектировании новых систем или систем с малым периодом эксплуатации, когда базы статистических данных о

системе отсутствуют или имеют недостаточный объём для получения статистически надёжных результатов.

Процесс разработки аналитических методов сопровождается строгим научным обоснованием с соблюдением всех принципов теории надёжности технических систем. Тем не менее, генерируемые с их помощью математические модели должны быть проверены на адекватность.

Проверка адекватности моделей преследует две цели:

- доказательство адекватности конкретных моделей;
- доказательство адекватности самого метода построения моделей.

Обе цели взаимосвязаны. Доказательство адекватности конкретных моделей подтверждает адекватность аналитического метода и свидетельствует о безошибочности проведения многоэтапной процедуры построения данных моделей. Доказательство же адекватности метода гарантирует его универсальность, т.е. подтверждает правомерность его использования для получения модели произвольной системы. Последнее особенно актуально для сложных систем, когда проверка адекватности модели представляет собой достаточно трудоёмкий процесс.

Проверку адекватности целесообразно основывать на статистических методах, которые позволяют непосредственно оценить тот или иной показатель надёжности системы. При этом проверка считается успешной, если значение показателя, рассчитанное по аналитической модели, попадёт в доверительный интервал значений, полученный методами статистического анализа.

Проверка адекватности аналитических моделей на основе методов статистического анализа для систем с продолжительным периодом эксплуатации не вызывает особых затруднений, если службы эксплуатации собрали полную информацию о сбоях в поставках целевого продукта каждому потребителю системы. Тривиальная статистическая обработка собранных данных позволяет проверить адекватность модели.

Совсем иначе обстоит дело с новыми или проектируемыми системами. В этом случае для проверки адекватности моделей

необходимо организовать довольно сложный вычислительный эксперимент.

Современные информационные и компьютерные технологии позволяют создавать виртуальные системы и осуществлять сбор виртуальных данных о поведении этих систем, ни в чём не уступающих обычным статистическим данным. Более того, в виртуальных системах можно управлять масштабом времени и сжимать период эксплуатации системы до продолжительности работы программы, реализующей процедуру проверки адекватности. При этом реальные периоды эксплуатации систем, измеряемые годами, заменяются виртуальными, измеряемые секундами.

Скоротечность работы компьютерных программ позволяет кардинально изменить качество проверки. Теперь нет необходимости строить доверительные интервалы для исследуемого показателя, поскольку многократное повторение эксперимента, согласно закону больших чисел [4], приводит к истинному значению показателя функциональной надёжности

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i^f = P^f, \quad (2.1)$$

где  $n$  – достаточно большое количество экспериментов по проверке адекватности модели;  $\tilde{P}_i^f$  – случайное значение показателя функциональной надёжности при  $i$ -м эксперименте;  $P^f$  – истинное, или адекватное, значение показателя функциональной надёжности.

Виртуальная проверка адекватности требует дополнительных усилий, связанных с определением частных значений показателя функциональной надёжности  $\tilde{P}_i^f$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Сложность структуры трубопроводной сети и её размерность (количественный состав структурных компонентов) оказывают прямое влияние на трудоёмкость вычислительного эксперимента по определению  $\tilde{P}_i^f$ . Чем сложнее структура и чем больше размерность трубопроводной сети, тем больше трудоёмкость проведения вычислительного

эксперимента. Поэтому проверку адекватности аналитического метода целесообразно проводить на моделях простых систем.

Из всех трубопроводных систем, используемых в хозяйственной деятельности городов, регионов и страны в целом, наиболее подходящими для проверки адекватности аналитического метода являются магистральные трубопроводные транспортные системы, которые по пути транспортировки от источника до конечного пункта не имеют промежуточных пунктов отбора целевого продукта. Объясняется это тем, что данные системы имеют малую размерность: один источник целевого продукта, один потребитель, малое количество трубопроводных участков. Причём все трубопроводные участки обладают однородностью: имеют одинаковый диаметр труб, толщину стенок, материал изготовления и достаточно равные условия эксплуатации и проведения аварийно-ремонтных и профилактических работ. Однородность участков позволяет в программе проверки использовать одну интенсивность отказов  $\lambda$  и одну интенсивность восстановления  $\mu$  для всех трубопроводов. Кроме того, структуру проверяемых магистральных трубопроводных систем можно значительно упростить: нет необходимости рассматривать всю магистраль – достаточно ограничиться её фрагментом. Здесь протяженная магистральная система может быть сведена к системе с одной перемычкой. В зависимости от типа конструкции перемычки [27] получаем целый ряд различных простых структур, а следовательно, и целый ряд математических моделей функциональной надёжности для проверки адекватности метода.

После того, как адекватность метода будет доказана, проверка адекватности других конкретных моделей уже будет необязательна. Её проведение может быть вызвано только желанием убедиться, что при генерации модели не была допущена ошибка. Такая проверка целесообразна только для систем, имеющих стратегическое значение, когда цена возможной ошибки во много раз превышает затраты на постановку эксперимента.

Проверка адекватности моделей для систем с разными структурами требует отдельного вычислительного эксперимента. Связано это с тем, что при различных структурах системы алгоритмы, определяющие зависимость поставки целевого продукта разным

пользователям от очередного отказа в системе, также различны. Автоматическая или даже автоматизированная генерация программы, которая реализует такой интеллектуальный алгоритм для произвольной системы, крайне сложна.

## **2.2. Особенности вычислительного эксперимента для проверки адекватности конкретной математической модели**

Вычислительный эксперимент имитирует во времени и пространстве эксплуатацию системы, для которой проверяется адекватность модели функциональной надёжности. Имитация заключается в организации с помощью генератора случайных чисел аварийных ситуаций (отказов) на различных элементах трубопроводной системы в течение расчётного периода времени  $T$  и подсчёте относительного времени бесперебойной поставки целевого продукта каждому потребителю системы.

Все отказы, возникающие в системе в течение периода времени  $T$ , в зависимости от структурного элемента трубопроводной сети делятся на:

- отказы трубопроводных участков;
- отказы запорной арматуры (задвижек).

В свою очередь, отказы на трубопроводных участках в зависимости от их интенсивности возникновения и интенсивности устранения (интенсивность восстановления трубопроводного участка) делятся на  $J_1$  групп в соответствии с количеством групп однородных трубопроводных участков. Так, для системы на рис.1.1 количество групп  $J_1 = 3$ , поскольку интенсивность возникновения отказов принимает три разных значения  $\lambda \in \{0,20 \quad 0,26 \quad 0,40\}$ . При этом каждому конкретному значению интенсивности возникновения отказа соответствует одна и та же интенсивность восстановления  $\mu$  (или 0,01, или 0,007, или 0,003).

Основной критерий, характеризующий принадлежность отказов одной группе, – равный промежуток времени для их устранения.

Для трубопроводных сетей с простой структурой  $J_1 = 1$ , т.е. все отказы выводят из строя аварийный участок на один и тот же период времени.

### 2.3. Определение параметров отказов трубопроводных участков

Для групп отказов на трубопроводных участках их количество в каждой группе определяется по формуле:

$$n_g = \text{int} \left( \lambda_g \sum_{i=1}^{Card \mathbf{E}} l(t_i) Q_i + 0,5 \right), \quad g = \overline{1, J_1}, \quad (2.2)$$

где  $g$  – индекс (номер) однородной группы отказов;  $\text{int}(\cdot)$  – функция взятия целой части числа;  $\lambda_g$  – интенсивность возникновения отказов для  $g$ -й группы;  $J_1$  – количество групп однородных

участков;  $\sum_{i=1}^{Card \mathbf{E}} l(t_i) Q_i = l_g$  – общая протяженность трубопрово-

дов  $g$ -й группы. Здесь  $Card \mathbf{E}$  – общее число трубопроводных участков, или мощность множества рёбер в математической модели трубопроводной сети;  $l(t_i)$  – длина  $i$ -го трубопроводного участка сети;  $Q_i$  – целочисленная переменная, равная 0, если участок  $t_i$  не входит в  $g$ -ю группу, и равная 1 – в противном случае. Константа 0,5 в выражении (2.2) используется для преобразования функции  $\text{int}(\cdot)$  в функцию округления до ближайшего целого числа. Так, в условиях примера на рис.1.1:

– для 1-й группы отказов на трубопроводных участках

$$n_1 = \text{int} \left( \lambda_1 \sum_{i=1}^{Card \mathbf{E}} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \text{int}[0,20 \cdot l(t_1) + 0,5] = \\ = \text{int}(0,20 \cdot 10 + 0,5) = 2 ;$$

– для 2-й группы отказов на трубопроводных участках

$$n_2 = \text{int} \left( \lambda_2 \sum_{i=1}^{Card \mathbf{E}} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \\ = \text{int}\{0,26 \cdot [l(t_2) + l(t_3) + l(t_4) + l(t_5) + l(t_6)] + 0,5\} = \\ = \text{int}[0,26 \cdot (8 + 7 + 6 + 7 + 5) + 0,5] = \text{int}(9,08) = 9 ;$$

– для 3-й группы отказов на трубопроводных участках

$$n_3 = \text{int} \left( \lambda_3 \sum_{i=1}^{Card \mathbf{E}} l(t_i) Q_i + 0,5 \right) = \\ \text{int}\{0,40 \cdot [l(t_7) + l(t_8) + \dots + l(t_{16})] + 0,5\} = \\ = \text{int}[0,40 \cdot (4 + 4 + 3 + 2 + 0,4 + 0,4 + 0,5 + 0,7 + 0,3 + 0,5) + 0,5] = \\ = \text{int}(6,82) = 6 .$$

*Примечание.* Присутствие операции округления негативно сказывается на процессе доказательства адекватности метода. Поэтому при доказательстве (и только доказательстве) адекватности метода следует подбирать трубопроводные системы таким образом, чтобы операции округления отсутствовали.

Каждый  $k$ -й отказ в системе на трубопроводном участке характеризуется тремя параметрами ( $k = \overline{1, n_\Sigma}$ , где  $n_\Sigma = \sum_{g=1}^{J_1} n_g$  – суммарное число отказов на трубопроводных участках):

- местом возникновения отказа (случайный индекс  $\tilde{i}$  трубопроводного участка  $t_i$ , на котором произошёл отказ);
- случайным временем наступления отказа  $\tilde{t}_k$  (значение на временной оси в интервале от 0 до величины  $T$ );
- временем ликвидации отказа  $\tau_k$ .

Для определения параметра «место возникновения отказа» на трубопроводных участках для каждой однородной группы участков строим координатную линию, на которой последовательно отмечаем начало и конец каждого участка. Начало первого участка имеет координату 0. Конец последнего участка имеет координату, равную суммарной длине всех участков группы. Конец каждого предыдущего участка является началом следующего. Для каждого участка указываем соответствующее значение индекса  $i$ .

На рис. 2.1,а показана координатная линия для 1-й группы, на рис. 2.1,б – для 2-й группы; на рис. 2.1,в – для 3-й группы.

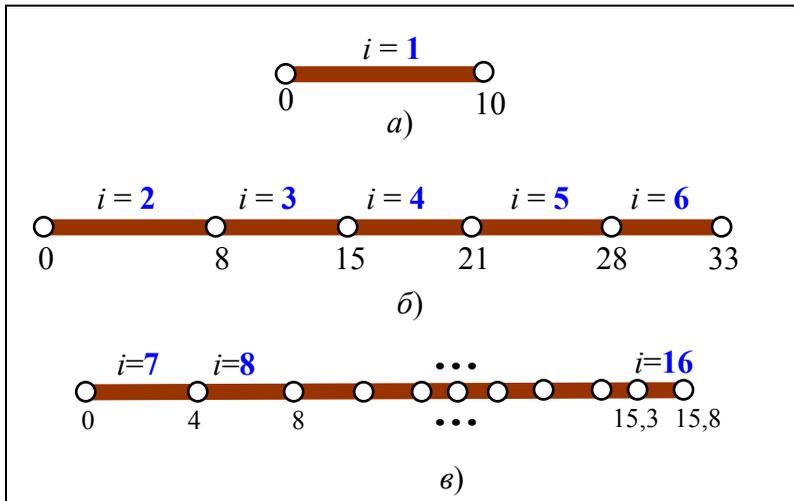


Рис. 2.1 – Координатные линии для однородных групп трубопроводных участков

Для каждого из 2-х отказов первой группы ( $n_1 = 2$ ) индекс трубопровода  $i = 1$ .

Если количество трубопроводных участков в группе больше единицы, как это имеет место во 2-й группе, то для определения индекса трубопровода предварительно определяется двумерный массив  $\mathbf{G}^g$  с индексами трубопроводов и соответствующими координатами конца участка на координатной линии, где  $g$  – номер группы. Так, для 2-й группы массив содержит элементы, представленные в табл. 2.1. Непосредственные элементы массива в таблице выделены двойной рамкой. Элементы массива 1-й строки ( $r = 1$ ) могут быть не упорядочены по возрастанию, а элементы 2-й строки ( $r = 2$ ) обязательно должны быть упорядочены по возрастанию.

Таблица 2.1  
Элементы массива  $\mathbf{G}^2$

$r \backslash j$	1	2	3	4	5
1	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
2	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>28</b>	<b>33</b>

Вторая группа отказов содержит 9 отказов ( $n_2 = 9$ ). Конкретное значение параметра «место возникновения отказа» для каждого  $k$ -го отказа 2-й группы ( $k = \overline{3,11}$ ) определяется с помощью рекурсивной функции

$$f_k(j, x) = \begin{cases} g_{1j}^2, & \text{если } x < g_{2j}^2; \\ f_k(j+1, x), & \text{если } x \geq g_{2j}^2, \end{cases} \quad (2.3)$$

Адекватность метода АРЗ

где  $j, x$  – параметры рекурсивной функции;  $g_{kj}^2$  – элементы массива  $G^2$ .

При каждом обращении к функции (2.2) её целочисленный параметр  $j$  всегда равен 1, а параметр  $x$  есть действительное число, определяемое выражением

$$x = l_2 \cdot \tilde{x}. \quad (2.4)$$

Здесь  $l_2$  – протяженность всех трубопроводов 2-й группы ( $l_2 = 33$ );  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1.

Конкретное значение параметра «место возникновения» для каждого из 6-и отказов 3-й группы ( $n_3 = 6$ ) определяется аналогичным образом, т.е. строится массив  $G^3$  (табл. 2.2).

Таблица 2.2  
Элементов массива  $G^3$

$r \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	4	8	11	13	13,4	13,8	14,3	15	15,3	15,8

Конкретное значение параметра «место возникновения отказа» для каждого  $k$ -го отказа 3-й группы ( $k = \overline{1,2,17}$ ) определяется с помощью рекурсивной функции

$$f_k(j, x) = \begin{cases} g_{1j}^3, & \text{если } x < g_{2j}^3; \\ f_k(j+1, x), & \text{если } x \geq g_{2j}^3. \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $j, x$  – параметры рекурсивной функции;  $g_{kj}^3$  – элементы массива  $\mathbf{G}^3$ .

При каждом обращении к функции (2.5) её целочисленный параметр  $j$  всегда равен 1, а параметр  $x$  есть действительное число, определяемое выражением

$$x = l_3 \cdot \tilde{x}. \quad (2.6)$$

Здесь  $l_3$  – протяженность всех трубопроводов 3-й группы ( $l_3 = 15,8$ );  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1.

Для всех отказов на трубопроводных участках формируется двумерный массив  $\mathbf{M}^{T1}$ , прообразом которого в условиях примера служит табл. 2.3. Непосредственные элементы массива в таблице выделены двойной рамкой.

Таблица 2.3  
Значения параметров отказов трубопроводов (массив  $\mathbf{M}^{T1}$ )

Индекс парам. $r$	Параметр	Индекс отказа $k$							
		1	2	3	...	11	12	...	17
1	Индекс места	1	1	$f_3$	...	$f_{11}$	$f_{12}$	...	$f_{17}$
2	Время наступления	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	$\tilde{t}_3$	...	$\tilde{t}_{11}$	$\tilde{t}_{12}$	...	$\tilde{t}_{17}$
3	Время устранения	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	...	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	...	$\tau_{17}$

Первая строка массива ( $r = 1$ ) заполняется по результатам определения «места возникновения отказа». Для первой группы отказов ( $k = 1,2$ ) данный параметр равен 1; для 2-й группы отка-

зов ( $k = \overline{3,11}$ ) данный параметр рассчитывается по формуле (2.3); для 3-й группы ( $k = \overline{12,17}$ ) – по формуле (2.5).

Вторая строка ( $r = 2$ ) содержит случайным образом заданные моменты начала наступления отказа. Данные для второй строки формируются в результате последовательного обращения к генератору случайных чисел с равномерным распределением от 0 до 1 по формуле

$$\tilde{t}_k = \text{int}(365 \cdot \tilde{x}), \quad k = \overline{1, n_\Sigma}, \quad (2.7)$$

где  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых

в интервале от 0 до 1;  $n_\Sigma = \sum_{g=1}^{J_1} n_g$  – суммарное число отказов на

трубопроводных участках в системе (в условиях примера  $n_\Sigma = 17$ );  $\text{int}(\cdot)$  – оператор взятия целой части числа; 365 – коэффициент преобразования единицы измерения времени год в сутки.

Третья строка массива ( $r = 3$ ) получается из второй путем увеличения её значений на величину, равную продолжительности устранения  $k$ -го отказа  $\Delta t_k$  в сутках:

$$\tau_k = \tilde{t}_k + \Delta t_k = \tilde{t}_k + \frac{365}{\mu_k}. \quad (2.8)$$

Для отказов каждой группы однородных трубопроводных участков интенсивность восстановления  $\mu_k$  одинакова. Так, в условиях примера (см. табл. 1.1) для 1-й группы продолжительность устранения отказа  $\Delta t_k = 3,65$  ( $k = \overline{1,2}$ ); для 2-й группы –  $\Delta t_k = 2,555$  ( $k = \overline{3,11}$ ); для 3-й группы –  $\Delta t_k = 1,095$  ( $k = \overline{12,17}$ ).

Для организации вычислительного эксперимента необходимо знать количество отказов трубопроводных участков для каждой однородной группы и параметры каждого отказа.

## 2.4. Определение параметров отказов запорной арматуры

Отказы на запорной арматуре в зависимости от её надёжности (относительного времени исправного состояния в течение периода времени  $T$ ) делятся на  $J_2$  групп. Отказы каждой группы имеют равную вероятность возникновения и равное время на их устранение. Для трубопроводных сетей с простой структурой  $J_2 = 1$ .

Для организации вычислительного эксперимента необходимо знать количество отказов запорной арматуры для каждой однородной группы и параметры каждого отказа.

Для групп отказов на существенной запорной арматуре их количество в каждой группе определяется по формуле:

$$m_h = \text{int} \left( \frac{[1 - p_h] T \sum_{j=1}^{Card A} Q_j}{\Delta t_h} + 0,5 \right), \quad h = \overline{1, J_2}, \quad (2.9)$$

где  $h$  – индекс (номер) однородной группы отказов на запорной арматуре;  $\text{int}(\cdot)$  – функция взятия целой части числа;  $p_h$  – вероятность безотказной работы задвижки  $h$ -й группы;  $T$  – расчётный период для надёжности системы;  $J_2$  – количество групп однородных задвижек;

$\sum_{j=1}^{Card A} Q_j = q_h$  – общее количество задвижек  $h$ -й группы;  $Card A$  – общее число существенных задвижек в сети;

$\Delta t_h$  – период времени, необходимый для устранения одного от-

каза на задвижках  $h$ -й группы;  $Q_j$  – целочисленная переменная, равная 0, если задвижка принадлежит  $h$ -й группе, и равная 1 – в противном случае.

Для конкретизации данных вычислительного эксперимента без потери общности доказательства для всех групп задвижек принимаем  $T = 1$  [год], а  $\Delta t = \frac{1}{365}$  [год]. Тогда формула (2.9) принимает вид

$$m_h = \text{int} \left[ 365 \cdot (1 - p_h) \sum_{j=1}^{\text{Card } A} Q_j + 0,5 \right], \quad h = \overline{1, J_2}. \quad (2.10)$$

Так, в условиях примера на рис.1.1:

– для 1-й группы отказов на запорной арматуре

$$m_1 = \text{int} [365 \cdot (1 - p_1) a_1 + 0,5] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,99) \cdot 1 + 0,5] = 4;$$

– для 2-й группы отказов на запорной арматуре

$$m_2 = \text{int} [365 \cdot (1 - p_2) a_2 + 0,5] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,98) \cdot 3 + 0,5] = 22;$$

– для 3-й группы отказов на запорной арматуре

$$m_3 = \text{int} [365 \cdot (1 - p_3) a_3 + 0,5] = \text{int} [365 \cdot (1 - 0,97) \cdot 8] = 88.$$

Каждый  $k$ -й отказ в системе на задвижках характеризуется тремя параметрами ( $k = \overline{1, m_\Sigma}$ , где  $m_\Sigma = \sum_{h=1}^{J_2} m_h$  – суммарное число отказов на запорной арматуре):

– местом возникновения отказа (случайный индекс  $\tilde{j}$  задвижки  $a_j$ , на которой произошёл отказ);

– случайным временем наступления отказа  $\tilde{t}_k$  (значение на временной оси в интервале от 0 до величины  $T$ );

– временем устранения отказа  $\tau_k$ .

Для отказов на запорной арматуре, как это было и для трубопроводов, формируется массив  $\mathbf{M}^{31}$ , прообразом которого может служить табл. 2.4.

Таблица 2.4  
Значения параметров отказов запорной арматуры (массив  $\mathbf{M}^{31}$ )

Индекс парам. $r$	Параметр	Индекс отказа $k$									
		1	...	4	5	...	26	27	...	114	
1	Индекс места	1	...	1	$f_5$	...	$f_{11}$	$f_{12}$	...	$f_{17}$	
2	Время наступления	$\tilde{t}_1$	...	$\tilde{t}_4$	$\tilde{t}_5$	...	$\tilde{t}_{11}$	$\tilde{t}_{12}$	...	$\tilde{t}_{17}$	
3	Время устранения	$\tau_1$	...	$\tau_4$	$\tau_5$	...	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	...	$\tau_{17}$	

Параметр «место возникновения отказа» на запорной арматуре для каждой группы отказов определяется по ниже приведенной методике.

Если в группе число задвижек равно единице, как это в условиях примера имеет место для 1-й группы, то индекс места отказа (параметр «место возникновения отказа») равен индексу этой задвижки.

Если количество задвижек в однородной группе больше единицы, как это имеет место в условиях примера для 2-й и 3-й групп, то предварительно для каждой группы создаётся одномерный массив  $\mathbf{N}^h$  с индексами задвижек  $a_j$ . Здесь  $h$  – индекс группы однородных задвижек ( $h \in \{1, 2, \dots, J_2\}$ ). Так, для 2-й группы задвижек массив содержит элементы, представленные в табл. 2.5, для 3-й группы – в табл. 2.6. Непосредственно элемен-

ты массивов в таблицах выделены двойной рамкой. Элементы массивов могут быть не упорядочены по возрастанию.

Таблица 2.5  
Элементы массива  $\mathbf{H}^2$

Индекс элемента массива $j$	1	2	3
Значение элемента массива (индекс задвижки $a_j$ )	2	3	4

Таблица 2.6  
Элементы массива  $\mathbf{H}^3$

Индекс элемента массива $j$	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение элемента массива (индекс задвижки $a_j$ )	5	6	7	8	9	10	11	12

Конкретное значение параметра «место возникновения отказа», которое вносится в табл. 2.4, для каждого из 22 отказов 2-й группы ( $m_2 = 22$ ) определяется как элемент  $h_j^2$  массива  $\mathbf{H}^2$ . Индекс элемента  $h_j^2$  вычисляется по формуле

$$j = \text{int}(q_2 \tilde{x} + 1), \quad (2.11)$$

где  $q_2$  – количество задвижек во 2-й однородной группе (в условиях примера  $q_2 = 3$ );  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1;  $\text{int}(\cdot)$  – функция взятия целой части числа.

Конкретное значение параметра «место возникновения отказа» для каждого из 88 отказов 3-й группы ( $m_3 = 88$ ) определяется аналогичным образом – как элемент  $h_j^3$  массива  $\mathbf{H}^3$ . Индекс элемента  $h_j^3$  вычисляется по формуле

$$j = \text{int}(q_3 \tilde{x} + 1), \quad (2.12)$$

где  $q_3$  – количество задвижек в 3-й однородной группе (в условиях примера  $q_3 = 8$ ).

Значение параметра «время наступления» для всех отказов на запорной арматуре определяется с помощью выражения

$$\tilde{t}_k = \text{int}(365 \cdot \tilde{x}), \quad k = \overline{1, m_\Sigma}, \quad (2.13)$$

где  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых

в интервале от 0 до 1;  $m_\Sigma = \sum_{h=1}^{J_2} m_h$  – суммарное число отказов на

запорной арматуре в системе (в условиях примера  $m_\Sigma = 114$ );  $\text{int}(\cdot)$  – оператор взятия целой части числа; 365 – коэффициент преобразования единицы измерения времени.

Значение параметра «время устранения» определяется по формуле

$$\tau_k = \tilde{t}_k + \Delta t, \quad k = \overline{1, m_\Sigma}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta t$  – принятая продолжительность устранения отказа, численно равная  $\frac{1}{365}$  [год<sup>1</sup>].

## 2.5. Привязка отказов трубопроводов к аварийно-ремонтным зонам

Для дальнейшей организации вычислительного эксперимента целесообразно в массиве  $\mathbf{M}^{\text{т1}}$  параметр места отказа, определяющий индекс трубопровода в сети, преобразовать в параметр, определяющий индекс АРЗ, к которому относится соответствующий трубопровод. Такое преобразование позволит значительно упростить завершающую часть вычислительного эксперимента без искажения его сути.

Преобразование производится с помощью простой процедуры замены индекса трубопровода индексом АРЗ, к которой относится тот или иной трубопровод. В условиях примера преобразованным массивом является табл. 2.7.

Таблица 2.7

Преобразованный массив параметров отказов трубопроводов  
(массив  $\mathbf{M}^{n1}$ )

Индекс парам. $r$	Пара- метр	Индекс отказа $k$							
		1	2	3	...	11	12	...	17
1	Индекс АРЗ	1	1	$z_3$	...	$z_{11}$	$z_{12}$	...	$z_{17}$
2	Время наступ- ления	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	$\tilde{t}_3$	...	$\tilde{t}_{11}$	$\tilde{t}_{12}$	...	$\tilde{t}_{17}$
3	Время устране- ния	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	...	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	...	$\tau_{17}$

В табл. 2.7 параметр  $z_k$  ( $k = \overline{3,17}$ ) в условиях примера может принимать одно из значений: 2, 3, 4, 5 или 6.

## 2.6. Построение карт влияния отказов на поставку целевого продукта конкретным потребителям

Вычислительный эксперимент для проверки адекватности модели функциональной надёжности в условиях примера трубопроводной сети на рис. 1.1 предполагает 17 отказов на трубопроводных участках и 114 отказов на запорной арматуре.

При возникновении отказов на трубопроводной сети в течение расчётного периода времени  $T$  каждый конкретный потребитель в процессе устранения отказов может продолжать получать целевой продукт или оставаться без такового в зависимости от типа отказа (на трубопроводе или запорной арматуре) и места его возникновения, определяемого соответственно или индексом трубопровода, или индексом задвижки. В процессе вычислитель-

ного эксперимента при расчёте вероятности поставки целевого продукта каждому конкретному потребителю необходимо учитывать только отказы, влияющие на поставку продукта этому потребителю. Для исключения влияния на расчёт несущественных отказов составляются две карты влияния отказов на поставку целевого продукта конкретным потребителям:

- карта влияния отказов трубопроводных участков;
- карта влияния отказов запорной арматуры.

Карта влияния отказов трубопроводных участков на поставку целевого продукта представляет собой двумерный массив  $\mathbf{M}^{T^2}$ . Первое измерение массива определяет потребителя (индекс  $r$ ), второе – трубопроводный участок (индекс  $i$ ). Прообразом такого массива служит табл. 2.8, где  $R$  – количество потребителей в сети;  $I$  – количество АРЗ в сети.

Таблица 2.8

Карта влияния отказов в АРЗ на поставку целевого продукта конкретным потребителям (массив  $\mathbf{M}^{T^2}$ )

	1	2	...	$i$	...	$I$
1	$m_{11}$	$m_{12}$	...	$m_{1i}$	...	$m_{1I}$
2	$m_{21}$	$m_{22}$	...	$m_{2i}$	...	$m_{2I}$
...	...	...	...	...	...	...
$r$	$m_{r1}$	$m_{r2}$		$m_{ri}$		$m_{rI}$
...	...	...	...	...	...	...
$R$	$m_{R1}$	$m_{R2}$	...	$m_{Rij}$	...	$m_{RI}$

Значение элемента  $m_{ri}$  массива  $\mathbf{M}^{T^2}$  определяется в зависимости от влияния отказа в  $i$ -й АРЗ на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю, а именно:

$$m_{ri} = \begin{cases} 0, & \text{если не влияет;} \\ 1, & \text{если прерывает поставку;} \\ 2, & \text{если зависит от других АРЗ или задвижек.} \end{cases}$$

Для заполнения  $r$ -й строки массива  $\mathbf{M}^{T2}$  используют упрощенную схему макрографа АРЗ относительно  $r$ -го потребителя, дополненную обозначениями трубопроводных участков для каждой зоны. Так, в условиях примера для заполнения первой строки массива  $\mathbf{M}^{T2}$  используют упрощенную схему на рис. 2.2; второй строки – на рис. 2.3; третьей и четвертой строк – на рис. 2.4.

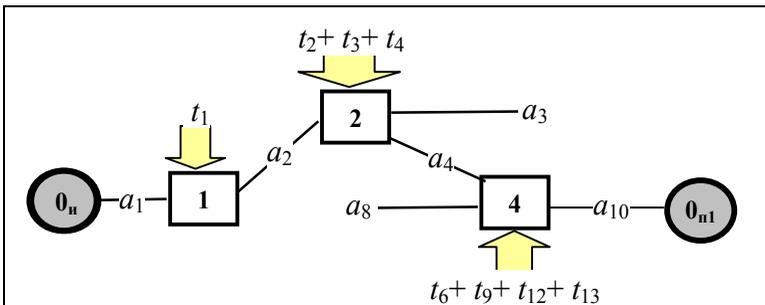


Рис. 2.2 – Упрощенный макрограф сети относительно потребителя  $O_{n1}$

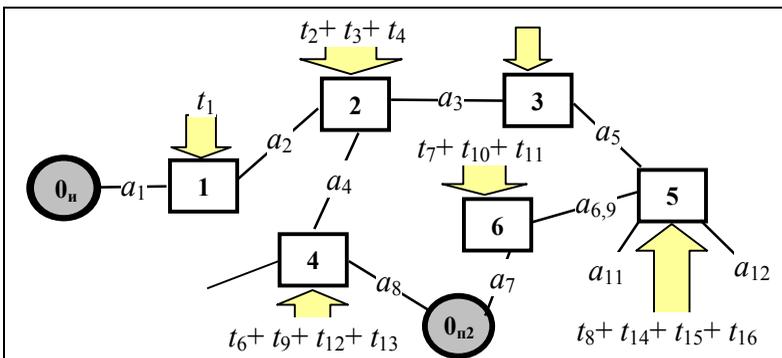


Рис. 2.3 – Упрощенный макрограф сети относительно потребителя  $O_{n2}$

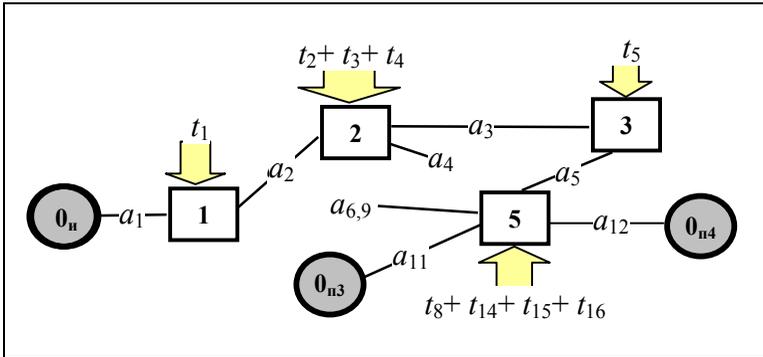


Рис. 2.4 – Упрощённый макрограф сети относительно потребителей  $O_{n3}$  и  $O_{n4}$

В условиях примера карта влияния отказов в АРЗ на поставку целевого продукта конкретным потребителям соответствует табл. 2.9.

Таблица 2.9  
Карта влияния отказов в АРЗ на поставку целевого продукта конкретным потребителям (массив  $M^{T^2}$ )

	1	2	3	4	5	6
1	1	1	0	1	0	0
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1	0

Массив  $M^{T^2}$  позволяет при проведении вычислительного эксперимента исключить из расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей значительное число отказов трубопроводов, не влияющих на поставку целевого про-

дукта этим потребителям. Исключение осуществляется на основе последовательного анализа всех отказов трубопроводов.

Анализ  $k$ -го отказа (в условиях примера  $k \in \{\overline{1,17}\}$ ), осуществляется по правилам:

– если элемент  $m_{ij}$  массива  $\mathbf{M}^{T2}$  равен нулю, то отказ соответствующего элемента сети ( $i$ -го трубопровода) не влияет на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю, и такой отказ не учитывается при расчёте функциональной надёжности сети относительно  $r$ -го потребителя;

– если элемент  $m_{ri}$  массива  $\mathbf{M}^{T2}$  равен единице, то отказ соответствующего элемента сети имеет непосредственное отношение к прерыванию поставки целевого продукта  $r$ -му потребителю. Такой отказ обязательно учитывается при расчёте функциональной надёжности сети относительно  $r$ -го потребителя;

– если элемент  $m_{ri}$  массива  $\mathbf{M}^{T2}$  равен двум, то влияние этого отказа на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю зависит от присутствия отказов на других элементах сети, обеспечивающих альтернативные маршруты поставок, а также от времени их возникновения и времени устранения. При отсутствии пересечения периода существования анализируемого  $k$ -го отказа с периодами существования отказов на других элементах такой отказ также исключается из расчёта. Элементы сети, от которых зависит  $k$ -й отказ, для каждого  $r$ -го потребителя определяются из соответствующей расчётной модели (рис. 1.9 в условиях примера). Время возникновения  $\tilde{t}_k$  и время устранения  $\tau_k$   $k$ -го отказа и всех присутствующих отказов других элементов, от которых зависит анализируемый, определяются из массивов  $\mathbf{M}^{T1}$  и  $\mathbf{M}^{S1}$ .

Карта влияния отказов запорной арматуры на поставку целевого продукта представляет собой двумерный массив  $\mathbf{M}^{S2}$ . Первое измерение массива определяет потребителя (индекс  $r$ ), второе – запорную арматуру (индекс  $j$ ). Прообразом такого массива служит табл. 2.10, где  $R$  – количество потребителей в сети;  $J$  – количество задвижек в сети.

Таблица 2.10  
Карта влияния отказов запорной арматуры на поставку  
целевого продукта (массив  $\mathbf{M}^{32}$ )

	1	2	...	$j$	...	$J$
1	$m_{11}$	$m_{12}$	...	$m_{1j}$	...	$m_{1J}$
2	$m_{21}$	$m_{22}$	...	$m_{2j}$	...	$m_{2J}$
...	...	...	...	...	...	...
$r$	$m_{r1}$	$m_{r2}$		$m_{rj}$		$m_{rJ}$
...	...	...	...	...	...	...
$R$	$m_{R1}$	$m_{R2}$	...	$m_{Rj}$	...	$m_{RJ}$

Значение элемента  $m_{rj}$  массива  $\mathbf{M}^{32}$  определяется в зависимости от влияния отказа  $j$ -й задвижки на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю, а именно:

$$m_{rj} = \begin{cases} 0, & \text{если не влияет;} \\ 1, & \text{если прерывает поставку;} \\ 2, & \text{если зависит от отказов других элементов сети.} \end{cases}$$

Для заполнения массива  $\mathbf{M}^{32}$  используют те же упрощенные схемы макрографа АРЗ относительно  $r$ -го потребителя, что и для массива  $\mathbf{M}^{T2}$ , или соответствующие расчётные модели функциональной надёжности (рис. 1.9 в условиях примера).

В условиях примера карта влияния отказов трубопроводов на поставку целевого продукта конкретным потребителям соответствует табл. 2.11.

Карта влияния отказов задвижек на поставку целевого продукта конкретным потребителям (массив  $\mathbf{M}^{32}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1
4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1

Массив  $\mathbf{M}^{32}$  позволяет при проведении вычислительного эксперимента исключить из расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей значительное число отказов запорной арматуры, не влияющих на поставку целевого продукта этим потребителям. Исключение осуществляется на основе последовательного анализа всех отказов запорной арматуры.

Анализ  $k$ -го отказа (в условиях примера  $k \in \{\overline{1,114}\}$ ), осуществляется по правилам:

- если элемент  $m_{ij}$  массива  $\mathbf{M}^{32}$  равен нулю, то отказ соответствующего элемента сети ( $j$ -й задвижки) не влияет на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю, и такой отказ не учитывается при расчёте функциональной надёжности сети относительно  $r$ -го потребителя;

- если элемент  $m_{ij}$  массива  $\mathbf{M}^{32}$  равен единице, то отказ соответствующего элемента сети имеет непосредственное отношение к прерыванию поставки целевого продукта  $r$ -му потребителю. Такой отказ обязательно учитывается при расчёте функциональной надёжности сети относительно  $r$ -го потребителя;

- если элемент  $m_{ij}$  массива  $\mathbf{M}^{32}$  равен двум, то влияние этого отказа на поставку целевого продукта  $r$ -му потребителю зависит от присутствия отказов других элементов сети, обеспечивающих альтернативные маршруты поставок, а также от времени их возникновения и времени устранения. При отсутствии пересечения

периода существования анализируемого  $k$ -го отказа с периодами существования отказов на других элементах такой отказ также исключается из расчёта. Элементы сети, от которых зависит  $k$ -й отказ, для каждого  $r$ -го потребителя определяются из соответствующей расчётной модели (рис. 1.9 в условиях примера). Время возникновения  $\tilde{t}_k$  и время устранения  $\tau_k$   $k$ -го отказа и всех присутствующих отказов других элементов, от которых зависит анализируемый, определяются из массивов  $\mathbf{M}^{T1}$  и  $\mathbf{M}^{31}$ .

## 2.7. Построение временных диаграмм поставки целевого продукта конкретным потребителям

Чтобы при проведении вычислительного эксперимента учесть возможность одновременного наступления различных отказов на сети и исключить их влияние на искажение результирующей надёжности, для каждого потребителя отдельно строится временная диаграмма поставки целевого продукта с указанием всех прерываний поставки в течение расчётного периода времени  $T$ .

Все диаграммы строят на основании массивов:

- $\mathbf{M}^{T1}$  со значениями параметров отказов трубопроводов (в условиях примера массив соответствует табл. 2.7);
- $\mathbf{M}^{31}$  со значениями параметров отказов запорной арматуры (в условиях примера массив соответствует табл. 2.4);
- $\mathbf{M}^{T2}$ , определяющего зависимость поставок целевого продукта конкретным потребителям от отказов трубопроводов (в общем случае массив соответствует табл. 2.8, в условиях примера – табл. 2.9);
- $\mathbf{M}^{32}$ , определяющего зависимость поставок целевого продукта конкретным потребителям от отказов запорной арматуры (в общем случае массив соответствует табл. 2.10, в условиях примера – табл. 2.11).

Кроме того, если хотя бы один из массивов  $\mathbf{M}^{T2}$  и  $\mathbf{M}^{32}$  в  $r$ -й строке имеет один или более элементов, равных двум, то для построения диаграммы поставки целевого продукта  $r$ -му потребите-

лю привлекают соответствующую расчётную модель функциональной надёжности.

Временная диаграмма строится на оси времени, охватывающей расчётный период  $T$ . В условиях примера  $T = 365$  дней.

Временную ось удобно представлять вертикально, что позволяет строить диаграмму на нескольких последовательных страницах для достижения удобной разрешающей способности диаграммы. Временную ось дублируют для каждой АРЗ и задвижки, которые в массивах  $\mathbf{M}^{T^2}$  и  $\mathbf{M}^{3^2}$  имеют ненулевые значения. Дублированные оси проводятся параллельно основной на расстоянии, позволяющем удобно разместить их по ширине страницы. В условиях примера временная диаграмма поставки целевого продукта потребителю  $\mathbf{O}_{n1}$ , согласно табл. 2.9, будет иметь три дублированных оси с индексами 1, 2, 3 для АРЗ и, согласно табл. 2.10, шесть дублированных осей с индексами 1, 2, 3, 4, 8, 10 для задвижек.

По индексу АРЗ из табл. 2.7 выбирают время возникновения и время устранения отказов и отмечают соответствующие им периоды существования отказов в виде отрезков на оси с одноименным индексом. На каждой дублированной оси будет столько отрезков, сколько раз данный индекс встречается в первой строке табл. 2.7. Если время устранения отказа превышает величину 365, то соответствующее превышение переносят в начало оси.

Аналогичным образом поступают с отказами запорной арматуры, но используя уже табл. 2.4.

После построения отрезков на всех дублированных осях приступают к их анализу и коррекции (в случае необходимости). Анализируются оси АРЗ. Если отрезки на оси каким-либо образом перекрываются, то производят искусственную коррекцию путём наименьшего смещения отрезков по оси так, чтобы исключить наложение. Анализу должны последовательно подвергнуться все оси АРЗ.

Затем все отрезки каждой дублированной оси проецируют на основную ось. В результате проецирования основная ось также будет состоять из отрезков. При этом разность между величиной расчётного периода  $T$  и суммарной длиной всех отрезков, отне-

сённая ко всему расчётному периоду  $T$ , покажет искомую вероятность поставки целевого продукта потребителю  $\mathbf{O}_{n1}$ :

$$\tilde{P}^{f_1} = \frac{T - \sum_{i=1}^w \Delta t_i}{T}. \quad (2.15)$$

Здесь  $w$  – общее число отрезков на основной временной оси после проецирования;  $\Delta t_i$  – длина  $i$ -го временного отрезка, *сутки*.

Рассмотренная процедура построения временной диаграммы поставки целевого продукта потребителю  $\mathbf{O}_{n1}$  довольно проста. В процессе построения временной диаграммы не было необходимости прибегать к расчётным моделям функциональной надёжности. Совсем иначе обстоит дело с построением временной диаграммы для потребителя  $\mathbf{O}_{n2}$ . Связано это с тем, что вторые строки массивов  $\mathbf{M}^{t2}$  и  $\mathbf{M}^{s2}$  содержат элементы, равные двум.

Рассмотрим отличительные особенности построения временной диаграммы для потребителя  $\mathbf{O}_{n2}$  более подробно.

Дублированные оси строятся для каждой АРЗ и каждой задвижки, поскольку во вторых строках табл. 2.9 и 2.11 нет нулевых элементов.

Как и в случае построения временной диаграммы для потребителя  $\mathbf{O}_{n1}$ , на осях отмечаются временные отрезки возникающих отказов. Каждая дублированная ось анализируется на предмет перекрытия отрезков. В случае перекрытия отрезков в пределах одной оси или выхода отрезка за верхний предел расчётного периода производится соответствующая коррекция.

Затем производится дополнительная коррекция для каждой оси, которой в табл. 2.9 или 2.11 во 2-й строке соответствует ячейка со значением 2. В условиях примера дополнительной коррекции должны подвергнуться дублированные оси для АРЗ с индексами 3, 4, 5, 6 и для задвижек с индексами 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Коррекция для каждой оси осуществляется на основе анализа расчётной модели на рис. 1.9,б, который позволяет выявить элементы сети, от которых зависит прерывание поставки целевого продукта потребителю  $\mathbf{O}_{n2}$  в периоды устранения отказов, соот-

ветствующих отрезкам на корректируемой оси. Так, для оси АРЗ с индексом 3 отказы, соответствующие отрезкам на этой оси, прерывают поставку продукта только при возникновении отказов в АРЗ с индексом 4 или в задвижках с индексами 8 и 10, т.е. отказов в элементах сети, соответствующих верхней параллельной ветви в расчётной модели на рис. 1.9,б.

Дублированные оси выявленных элементов сети проектируются на корректируемую ось. Все отрезки или их части, которые не перекрываются спроектированными отрезками, удаляются с корректируемой оси, поскольку в соответствующие периоды поставка целевого продукта потребителю  $O_{п2}$  не прерывается.

Аналогичным образом корректируются дублированные оси АРЗ с индексами 4, 5, 6 и задвижек с индексами 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. И только после этого производят проектирование всех дублированных осей на основную временную ось. Искомая вероятность поставки целевого продукта потребителю  $O_{п1}$  определится по формуле, аналогичной формуле (2.15):

$$\tilde{P}^{f_2} = \frac{T - \sum_{i=1}^w \Delta t_i}{T}. \quad (2.16)$$

*Примечание.* При проверке адекватности считается, что службы эксплуатации трубопроводной сети имеют достаточное количество ремонтных бригад, для устранения одновременно возникающих отказов. Только в этом случае вероятность бесперебойной поставки целевого продукта конкретному пользователю совпадает с относительным временем получения продукта этим пользователем. Если число ремонтных бригад ограничено величиной  $N_6$ , то этот факт следует учитывать при коррекции дублированных осей и при проектировании их на основную ось. Если при наложении осей, число совпадающих отрезков превышает величину  $N_6$ , необходимо произвести соответствующее смещение отрезков на осях.

Расчёт по формулам (2.15) и (2.16) позволяет получить частные, а точнее – случайные значения показателей функциональной надёжности  $\tilde{P}^{f_1}$  и  $\tilde{P}^{f_2}$ . Для получения истинных значений необходимо повторить вычислительный эксперимент и расчёты достаточно большое количество раз. Расчёт истинных значений показателей производится по формуле (2.1).

## РАЗДЕЛ 3

### РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПРОВЕРКЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ

#### 3.1. Процедуры универсального вычислительного эксперимента для проверки адекватности моделей функциональной надёжности трубопроводных систем

Организация вычислительного эксперимента по проверке адекватности моделей функциональной надёжности даже для несложных трубопроводных систем требует больших затрат времени и сил.

Пусть для системы произвольной сложности уже с помощью метода АРЗ рассчитаны показатели функциональной надёжности системы относительно каждого потребителя системы, т.е. определены величины  $P^{\hat{f}_k}$ , где  $k = \overline{1, P}$ ;  $P$  – общее количество потребителей. Расчёт показателей функциональной надёжности предполагает, что программно реализованы все этапы метода АРЗ. А это значит, что введены все основные исходные данные о структуре и параметрах трубопроводной сети, построен исходный граф сети, проведено разбиение графа сети на подграфы АРЗ, рассчитаны показатели технической надёжности каждой АРЗ, построены и упрощены графы АРЗ сети относительно каждого потребителя, определены расчётные модели функциональной надёжности. Тогда вычислительный эксперимент для систем произвольной сложности предполагает разработку и отладку программного обеспечения для следующих процедур:

1. Разбиение по исходным данным всех трубопроводных участков (протяженных элементов) сети на однородные группы в

зависимости от интенсивности возникновения отказов  $\lambda$  и интенсивности восстановления  $\mu$ .

2. Расположение трубопроводных участков каждой однородной группы в одну координатную линию. Определение общей длины участков, координат начала и конца каждого участка. Формирование массива  $\mathbf{G}^g$  для каждой  $g$ -й группы трубопроводных участков.

3. Определение общего числа отказов на трубопроводных участках для каждой однородной группы в течение расчётного периода времени  $T$ .

4. Определение параметров отказов трубопроводных участков. Формирование массива  $\mathbf{M}^{T1}$ .

5. Разбиение запорной арматуры на однородные группы в зависимости от вероятности их безотказной работы. Формирование массива  $\mathbf{H}^h$  для каждой  $h$ -й группы запорной арматуры.

6. Определение общего числа отказов на запорной арматуре для каждой однородной группы в течение расчётного периода времени  $T$ .

7. Определение параметров отказов запорной арматуры. Формирование массива  $\mathbf{M}^{31}$ .

8. Привязка отказов трубопроводных участков к аварийно-ремонтным зонам. Преобразование массива параметров отказов трубопроводов  $\mathbf{M}^{T1}$  в массив  $\mathbf{M}^{n1}$ .

9. Составление карты влияния отказов в АРЗ на поставку целевого продукта конкретным потребителям. Формирование массива  $\mathbf{M}^{T2}$ .

10. Составление карты влияния отказов запорной арматуры на поставку целевого продукта конкретным потребителям. Формирование массива  $\mathbf{M}^{32}$ .

11. Построение основной временной оси для временной диаграммы поставки целевого продукта  $r$ -му потребителю сети и её дублирование для отказов каждой АРЗ и каждой задвижки, которым соответствуют ненулевые элементы в  $r$ -х строках массивов  $\mathbf{M}^{T2}$  и  $\mathbf{M}^{32}$ . Присвоение временным осям индексов, соответствующих индексам АРЗ и задвижек.

12. Построение отрезков, определяющих время возникновения и продолжительность отказов в АРЗ или запорной арматуре, на соответствующей дублированной оси.

13. Коррекция расположения отрезков на каждой оси в случае их перекрытия.

14. Анализ и дополнительная коррекция дублированных осей для тех элементов сети, которым в  $r$ -х строках массивов  $\mathbf{M}^{T2}$  и  $\mathbf{M}^{32}$  соответствуют элементы со значением 2.

15. Проецирование отрезков дублированных осей на основную временную ось диаграммы. Расчёт показателя функциональной надёжности относительно  $r$ -го потребителя.

16. Повторение процедур из пунктов 11 – 16 для каждого потребителя системы.

17. Повторение всех процедур из пунктов 1 – 17 достаточно большое количество раз для получения по формуле (2.1) истинных значений проверяемых показателей и сравнение последних с расчётными.

Приведенная последовательность процедур является универсальной, поскольку позволяет проверить адекватность математических моделей функциональной надёжности систем с произвольной структурой и составом трубопроводных сетей.

### **3.2. Особенности вычислительного эксперимента для проверки адекватности моделей функциональной надёжности простейших трубопроводных систем**

Как уже отмечалось ранее, для снижения трудоёмкости проведения эксперимента следует в качестве тестовых систем выбирать системы с простейшими структурами трубопроводных сетей. Примерами таких систем могут служить магистральные трубопроводы, состоящие из двух параллельных ниток трубопроводов, соединённых одной перемычкой.

На рис. 3.1 – 3.3 представлены исходные графы трёх вариантов магистральных сетей с несложными трубопроводными сетями.

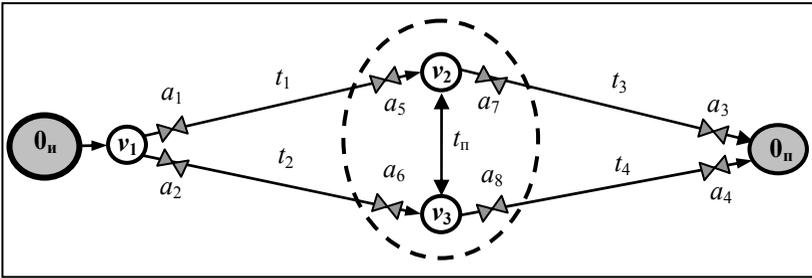


Рис. 3.1 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с четырьмя задвижками

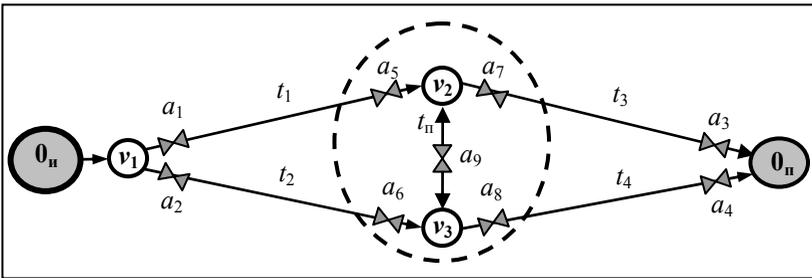


Рис. 3.2 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

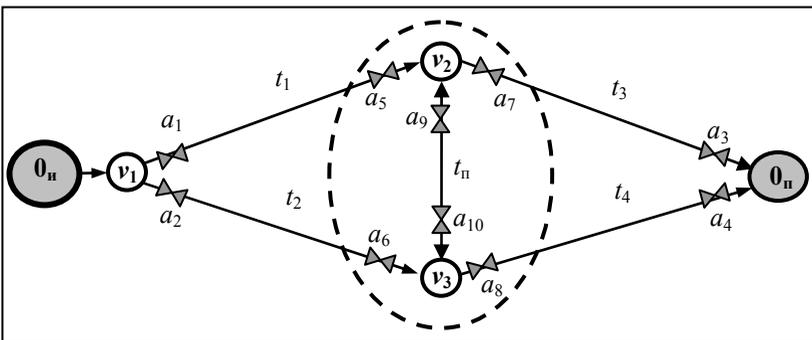


Рис. 3.3 – Граф-схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с шестью задвижками

Пунктирными овалами на схемах (рис. 3.1 – 3.3) выделены перемычки, соединяющие две нитки параллельных трубопроводов. Во всех системах трубопроводные сети соединяют единственный источник целевого продукта с единственным потребителем.

Представленные на рис. 3.1 системы отличаются друг от друга только количеством задвижек на центральной трубе перемычки:

- первая система не имеет задвижек;
- вторая система имеет одну задвижку ( $a_9$ );
- третья система имеет две задвижки ( $a_9$  и  $a_{10}$ ).

Вычислительный эксперимент для проверки адекватности математических моделей надёжности систем с простыми структурами трубопроводных сетей значительно упрощается по сравнению с универсальным экспериментом. Ещё менее трудоёмким являются вычислительный эксперимент, осуществляемый при допущении, что все задвижки обладают абсолютной надёжностью. В последнем случае задвижки не влияют на прерывание поставок целевого продукта потребителям и не участвуют в вычислительном эксперименте. Последовательность процедур, реализующая такой эксперимент, будет самой короткой, а сам эксперимент по трудоёмкости – самый лёгкий.

Приведём последовательность процедур вычислительного эксперимента, проводимого при условии, что вероятность выхода из строя любой задвижки трубопроводной сети в течение расчётного периода  $T$  равна нулю. С целью сравнения методик проведения экспериментов по трудоёмкости нумерацию процедур оставим такую, какая была в универсальной последовательности (см. предыдущий подраздел):

1. Процедура отсутствует.
2. Расположение всех трубопроводных участков сети в одну координатную линию. Определение общей длины участков, координат начала и конца каждого участка. Формирование только одного массива  $\mathbf{G}$ .
3. Определение общего числа отказов на трубопроводных участках в течение расчётного периода времени  $T$ .

Адекватность метода АРЗ

4. Определение параметров отказов трубопроводных участков. Формирование массива  $\mathbf{M}^{T1}$ .

5. Процедура отсутствует.

6. Процедура отсутствует.

7. Процедура отсутствует.

8. Привязка отказов трубопроводных участков к аварийно-ремонтным зонам. Преобразование массива параметров отказов трубопроводов  $\mathbf{M}^{T1}$  в массив  $\mathbf{M}^{n1}$ .

9. Составление карты влияния отказов в АРЗ на поставку целевого продукта потребителю. Формирование одномерного массива  $\mathbf{M}^{T2}$ .

10. Процедура отсутствует.

11. Построение основной временной оси для временной диаграммы поставки целевого продукта потребителю и её дублирование для отказов каждой АРЗ, которым соответствуют ненулевые элементы в массиве  $\mathbf{M}^{T2}$ . Присвоение временным осям индексов АРЗ.

12. Построение отрезков, определяющих время возникновения и продолжительность отказов в АРЗ, на соответствующей дублированной оси.

13. Коррекция расположения отрезков на каждой оси в случае их перекрытия.

14. Анализ и дополнительная коррекция дублированных осей для тех АРЗ, которым в массиве  $\mathbf{M}^{T2}$  соответствуют элементы со значением 2.

15. Проецирование отрезков дублированных осей на основную временную ось диаграммы. Расчёт показателя функциональной надёжности поставки целевого продукта потребителю.

16. Пункт отсутствует.

17. Повторение всех процедур из пунктов 1 – 17 достаточно большое количество раз с целью получения истинного значения проверяемого показателя и его сравнение с расчётным.

В приведенной последовательности отсутствует процедура пункта 1 по причине однородности отказов на всех трубопроводных участках. Процедуры пунктов 5 – 7 и 10 отсутствуют в силу принятого допущения об абсолютной надёжности всей запорной арматуры сети. Пункт 16 отсутствует в связи с присутствием в системе только одного потребителя. Процедуры остальных пунктов упрощаются по тем же причинам.

### **3.3. Упрощённый вычислительный эксперимент по проверке адекватности моделей функциональной надёжности простых трубопроводных сетей**

Проверим адекватность математических моделей, полученных методом АРЗ, для систем, схемы которых изображены на рис. 3.1 – 3.3.

Трубопроводные сети всех систем имеют одинаковые магистральные трубопроводные участки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ). Системы отличаются друг от друга только количеством задвижек на центральной трубе перемычки.

Пусть трубопроводные участки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) всех систем имеют равные параметры, а именно: длина  $l_i = 100$  км; интенсивность отказов  $\lambda = 0,1$  км<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>; интенсивность восстановления  $\mu = 365$  год<sup>-1</sup>. Пусть также вероятность безотказной работы любой задвижки равна единице.

Поскольку длины центральной трубы перемычки и труб, соединяющих напорные агрегаты (источники) с ближайшими задвижками, на несколько порядков меньше длины любого трубопроводного участка сети, то принимаем длины первых равными нулю.

Таким образом, все элементы систем на рис. 3.1 – 3.3, кроме трубопроводных участков  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ), являются абсолютно надёжными. При таком допущении все три системы будут иметь

одинаковую математическую модель функциональной надёжности

$$P^f = \left[ 1 - \left( \frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2, \quad (3.1)$$

где  $p$  – вероятность безотказной работы трубопровода, длина которого  $l$  в 2 раза больше длины любого из участков  $t_i$  ( $i \in \overline{1,4}$ ), т.е.  $l = 200$  км.

При заданных исходных данных

$$p = 1 - \frac{l\lambda}{\mu} = 1 - \frac{200 \cdot 0,1}{365} = 0,9452, \quad (3.2)$$

а функциональная надёжность, согласно математической модели (3.1),  $P^f = 0,9985$ .

Промежуточным результатом в процессе получения модели (3.1) является расчётная графическая модель, представленная на рис. 3.4. В модели отсутствуют блоки, соответствующие задвижкам и аварийно-ремонтным зонам с абсолютной надёжностью. Блоки с вероятностями  $p_i$  ( $i \in \overline{1,4}$ ) соответствуют одноимённым АРЗ.

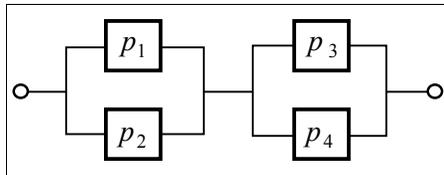


Рис. 3.4 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой

Докажем адекватность модели (3.1) с помощью упрощенного вычислительного эксперимента.

Согласно последовательности упрощённого эксперимента первая процедура (п. 2) располагает все трубопроводные участки сети в одну координатную линию (рис. 3.5) и формирует массив **G** (табл. 3.1).

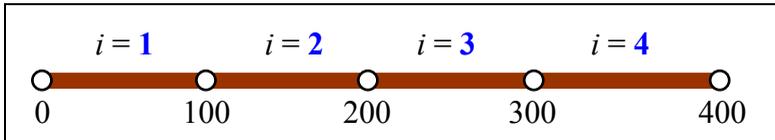


Рис. 3.5 – Координатная линия для трубопроводных участков

Таблица 3.1

Элементы массива **G**

$r \backslash j$	1	2	3	4
1	2	3	4	6
2	100	200	300	400

Затем определяется общее число  $n$  отказов трубопроводных участков (п.3) в течение расчётного периода времени  $T$  по формуле (2.2). В условиях упрощённого эксперимента формула (2.2) принимает вид

$$n = \text{int} \left( \lambda \sum_{i=1}^{\text{Card } E} l(t_i) + 0,5 \right). \quad (3.3)$$

При заданных исходных данных

$$n = \text{int} \left( 0,1 \sum_{i=1}^4 l(t_i) + 0,5 \right) = 40. \quad (3.4)$$

Далее, в соответствии с п. 4 последовательности процедур упрощённого вычислительного эксперимента определяются параметры отказов трубопроводных участков, и формируется массив параметров отказов **M** (табл. 3.2). В отличие от табл. 2.3, в табл. 3.2 отсутствует третья строка, поскольку она не несёт никакой полезной информации из-за одинаковой продолжительности всех отказов  $\Delta t_k = const = 1 \text{ сутки}$ .

Таблица 3.2  
Значения параметров отказов трубопроводов (массив **M**)

Индекс парам. $r$	Параметр	Индекс отказа $k$			
		1	2	...	40
1	Индекс места	$f_1$	$f_2$	...	$f_{40}$
2	Время наступления	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	...	$\tilde{t}_{40}$

В табл. 3.2 значение параметра  $f_k$  ( $k = \overline{1,40}$ ) определяется с помощью рекурсивной функции

$$f_k(j, x) = \begin{cases} g_{1j}, & \text{если } x < g_{2j}; \\ f_k(j+1, x), & \text{если } x \geq g_{2j}, \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $j, x$  – параметры рекурсивной функции;  $g_{1j}, g_{2j}$  – элементы массива  $\mathbf{G}^2$ .

При каждом обращении к функции (3.5) её целочисленный параметр  $j$  всегда равен 1, а параметр  $x$  есть действительное число, определяемое выражением

$$x = l \cdot \tilde{x} = 400 \cdot \tilde{x}.$$

Здесь  $l$  – общая протяженность всех трубопроводов сети;  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате обращения к гене-

ратору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1.

Случайное значение параметра  $\tilde{t}_k$  ( $k = \overline{1,40}$ ) определяется по формуле (2.7).

Следующая процедура должна соответствовать п.8. Но поскольку каждая АРЗ сети включает только один трубопроводный участок и индексы участков совпадают с индексами АРЗ, то процедура привязки АРЗ является избыточной. Выполнение процедуры приведёт к получению массива  $\mathbf{M}^{n1}$ , который ничем не отличается от массива  $\mathbf{M}^{n1}$ . Таким образом, данная процедура в упрощённом эксперименте для систем на рис. 3.1 – 3.3, как и процедуры п.п. 1, 5 – 7, 10 и 16, отсутствует.

В связи с симметричностью структурной схемы систем на рис. 3.1 – 3.3, выполнение всех последующих процедур (кроме последней, п.17) эквивалентно выполнению одной процедуры, схема алгоритма которой представлена на рис. 3.6.

Результатом выполнения последней процедуры является случайное значение показателя функциональной надёжности  $\tilde{P}^f$ .

В соответствии с последней процедурой п.17  $n$ -кратное выполнение всей последовательности процедур по определению показателя  $\tilde{P}^f$  и вычислению его среднего значения  $P_{\text{ср.}}^f$  по формуле (2.1) позволяет увидеть тенденцию изменения  $P_{\text{ср.}}^f$  в зависимости от  $n$ . Если  $P_{\text{ср.}}^f$  с ростом  $n$  стремится к значению

$P^f = 0,9985$ , полученному с помощью математической модели (3.1), то адекватность последней будет доказана.

Результаты вычислительного эксперимента (ВЭ-1) по изложенной упрощённой методике представлены в виде табл. 3.3 и диаграммы на рис. 3.7.

*Примечание.* Скачок на диаграмме при абсциссе  $i = 200$  обусловлен неравномерностью шкалы абсцисс.

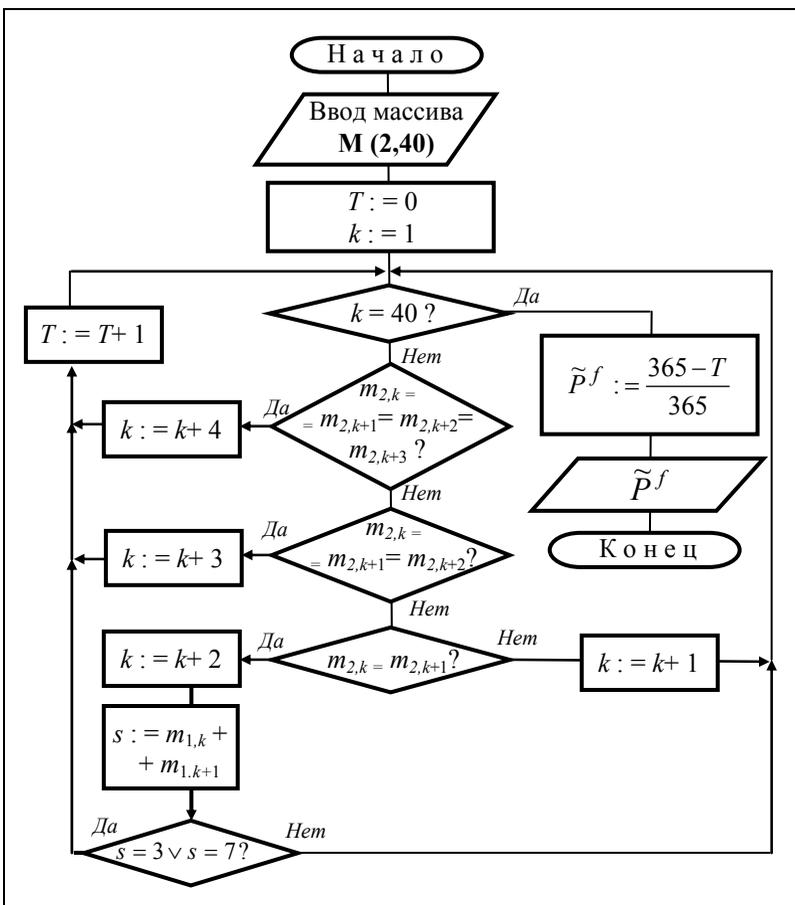


Рис. 3.6 – Схема алгоритма расчёта  $\tilde{P}^f$  по данным массива **M**

Данные в табл. 3.3 и диаграмма на рис. 3.7 показывают, что с ростом числа экспериментов  $n$  среднее значение надёжности  $P_{\text{ср}}^f$  неуклонно стремится к значению  $P^f = 0,9985$ , полученному с помощью математической модели (3.1). Следовательно, адекватность модели (3.1) доказана.

Таблица 3.3

Результаты вычислительного эксперимента ВЭ-1

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i^f$	$P_{\text{ср.}}^f$
1	0,997260	0,997260
2	0,994521	0,995890
3	0,997260	0,996347
4	0,997260	0,996575
5	1	0,997260
6	1	0,997717
7	0,997260	0,997652
8	1	0,997945
9	1	0,998174
10	1	0,998356
20	1	0,998630
30	1	0,998995
40	1	0,998904
50	1	0,998959
60	0,997260	0,998858
70	1	0,998943
80	0,997260	0,998973
90	1	0,998874
100	1	0,998849
200	1	0,998384
300	0,997260	0,998584
400	0,997260	0,998466
500	0,997260	0,998597

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i^f$	$P_{\text{ср.}}^f$
600	1	0,998479
700	1	0,998532
800	1	0,998640
900	1	0,998673
1000	1	0,998542
1100	0,994521	0,998446
1200	0,99726	0,998530
1300	1	0,998582
1400	1	0,998458
1500	0,99726	0,998579
1600	1	0,998580
1700	1	0,998546
1800	1	0,998452
1900	1	0,998538
2000	0,994521	0,998558
3000	0,99726	0,998561
4000	1	0,998542
5000	1	0,998525
6000	0,994521	0,998527
7000	1	0,998535
8000	0,99726	0,998510
9000	0,99726	0,998521
10000	0,99726	0,998524

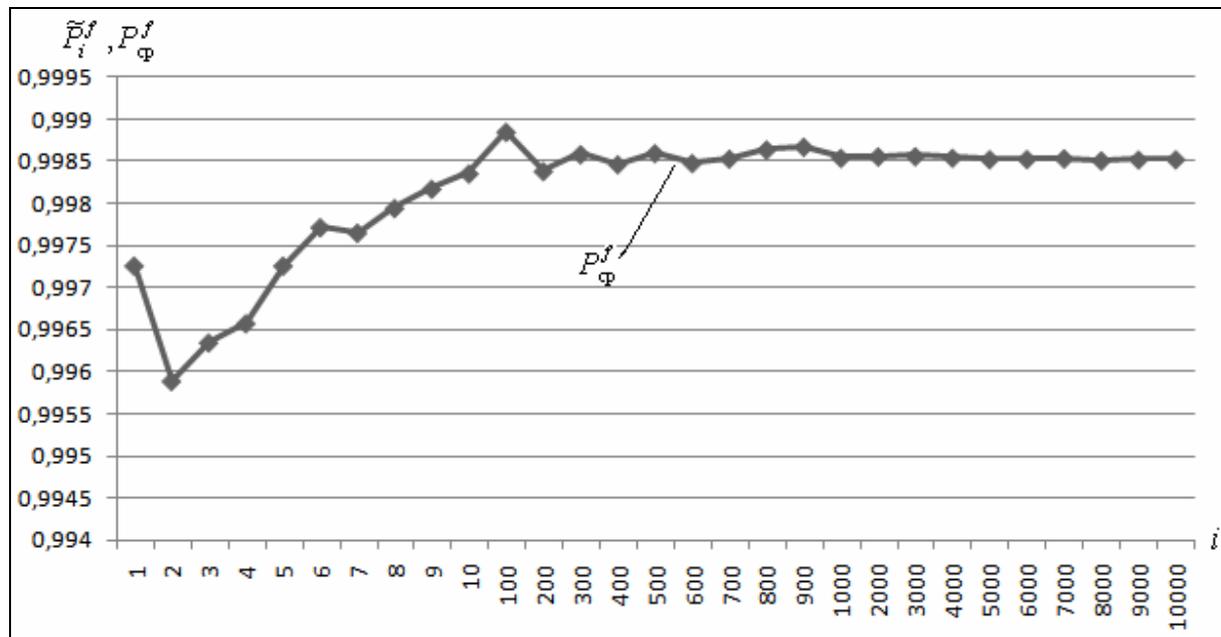


Рис. 3.7 – Диаграмма  $P_{\text{ср.}}^f$  в зависимости от количества экспериментов  $i$

### 3.4. Вычислительный эксперимент по проверке адекватности моделей функциональной надёжности с учётом надёжности запорной арматуры

Вычислительный эксперимент значительно усложняется, если при расчёте показателя функциональной надёжности учитывать надёжность запорной арматуры. Более того, вычислительные эксперименты для трёх систем на рис. 3.1 – 3.3 будут отличаться друг от друга, поскольку различны их математические и графические расчётные модели.

На рис. 3.8 – 3.10 приведены графы АРЗ для систем, изображенных на рис. 3.1 – 3.3. На рис. 3.11 – 3.13 приведены графические расчётные модели для тех же систем.

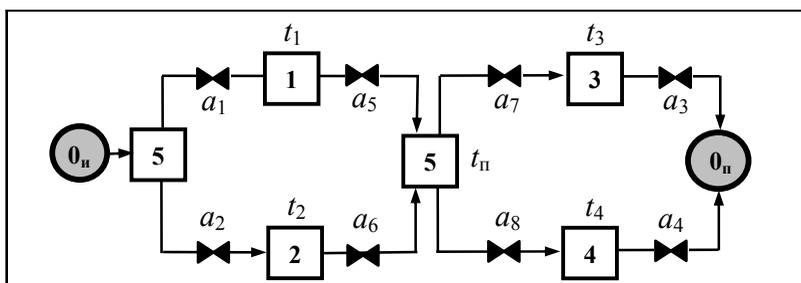


Рис. 3.8 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с четырьмя задвижками

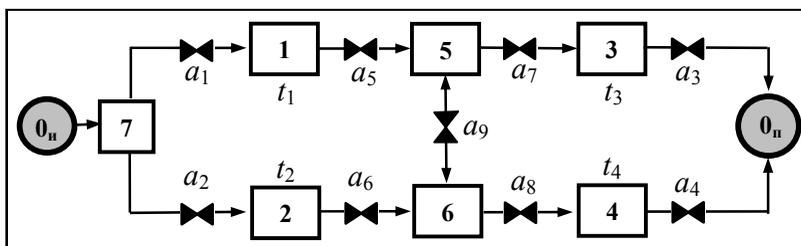


Рис. 3.9 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

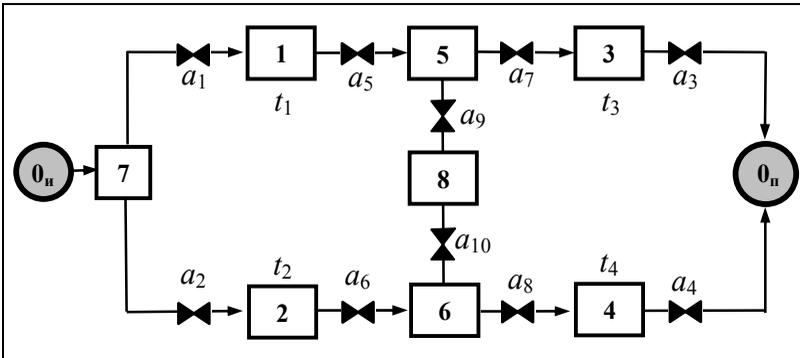


Рис. 3.10 – Граф APЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с шестью задвижками

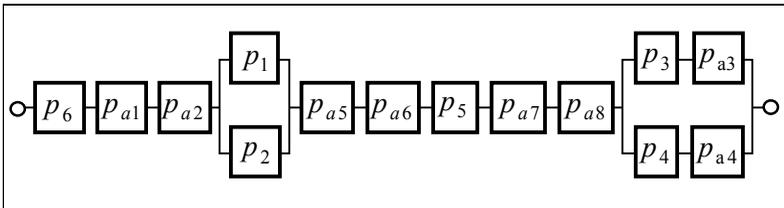


Рис. 3.11 – Расчётная графическая модель функциональной надёжности для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с четырьмя задвижками

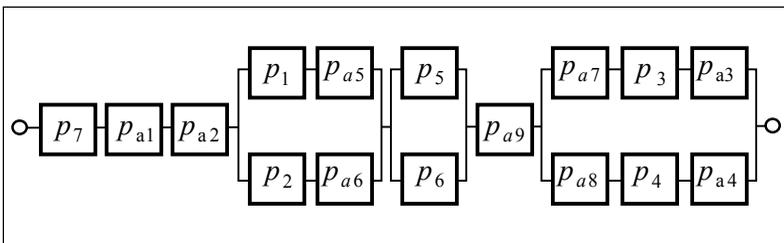


Рис. 3.12 – Расчётная графическая модель функциональной надёжности для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

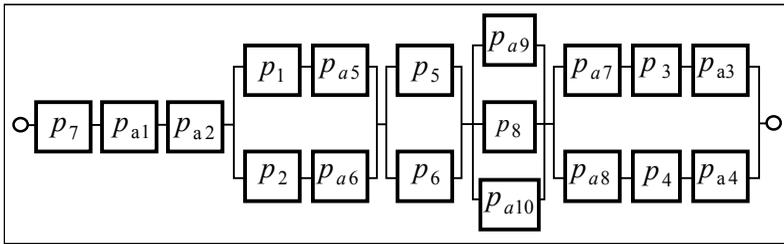


Рис. 3.13 – Расчётная графическая модель функциональной надёжности для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с шестью задвижками

Пусть трубопроводные участки  $t_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) всех систем на рис. 3.1 – 3.3 имеют равные параметры, а именно: длина  $l_i = 100$  км; интенсивность отказов  $\lambda = 0,1 \text{ км}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ; интенсивность восстановления  $\mu_T = 365 \text{ год}^{-1}$ . Пусть также вероятность безотказной работы  $p_a$  каждой задвижки равна 0,9918, а интенсивность восстановления совпадает с интенсивностью восстановления трубопроводных участков, т.е.  $\mu_a = \mu_T = 365 \text{ год}^{-1}$ .

Поскольку длины всех трубопроводных участков перемычки и трубопроводных участков, соединяющих напорные агрегаты с ближайшими задвижками, на несколько порядков меньше любого трубопроводного участка сети, то принимаем длины первых равными нулю. Следовательно, технические надёжности АРЗ с индексами 5, 6, 7 и 8 будут равны единице.

С учётом сделанных допущений математические модели функциональной надёжности, полученные методом АРЗ, будут иметь вид:

– для системы на рис. 3.1 в соответствии с расчётной моделью на рис. 3.11

Адекватность метода АРЗ

$$P^{f_1} = p_a^6 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]; \quad (3.6)$$

– для системы на рис. 3.2 в соответствии с расчётной моделью на рис. 3.12

$$P^{f_2} = p_a^3 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right]; \quad (3.7)$$

– для системы на рис. 3.3 в соответствии с расчётной моделью на рис. 3.13

$$P^{f_3} = p_a^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right] \left[ 1 - (1-p_a)^2 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right]. \quad (3.8)$$

В математических моделях (3.6) – (3.8), согласно выражению (3.2),  $p = 0,9452$ . Тогда численное значение показателя функциональной надёжности:

– для системы на рис. 3.1 в соответствии с математической моделью (3.6)  $P^{f_1} \approx 0,9499$ ;

– для системы на рис. 3.2 в соответствии с математической моделью (3.7)  $P^{f_2} \approx 0,97255$ ;

– для системы на рис. 3.3 в соответствии с математической моделью (3.8)  $P^{f_3} \approx 0,9805$ .

Докажем последовательно адекватность математических моделей (3.6) – (3.8), полученных методом АРЗ, с помощью универ-

сальной методики проверки адекватности, изложенной в подразделе 3.1.

Для модели (3.6) последовательность процедур проверки будет начинаться с п.2, поскольку все трубопроводные участки однородны.

Результатом выполнения процедуры п. 2 являются координатная линия (рис. 3.5) и массив  $\mathbf{G}$  (табл. 3.1).

Результатом выполнения процедуры п. 3 является число отказов трубопроводных участков  $n = 40$ , определяемое с помощью выражения (3.4).

Результатом выполнения процедуры п. 4 является массив  $\mathbf{M}^T$ , прообразом которого является табл. 3.2.

Процедура п. 5 отсутствует по причине однородности всех задвижек в системах.

Следующая процедура п.6 определяет число отказов  $m$  на запорной арматуре в течение расчётного периода времени  $T$ . В случае однородности всех задвижек число отказов на запорной арматуре рассчитывается по формуле

$$m = \text{int}[365 \cdot (1 - p_a) m_a + 0,5], \quad (3.9)$$

где  $p_a = 0,9918$  – вероятность безотказной работы задвижки в течение периода времени  $T$ ;  $m_a$  – общее число задвижек в системе.

Для системы на рис. 3.1  $m_a = 8$ . Число отказов  $m$  в соответствии с (3.9) принимает значение 24 с погрешностью  $\varepsilon = 0,23\%$ .

Для системы на рис. 3.2  $m_a = 9$ . Число отказов  $m$  в соответствии с (3.9) принимает значение 27 с погрешностью  $\varepsilon = 0,23\%$ .

Для системы на рис. 3.3  $m_a = 10$ . Число отказов в соответствии с (3.9) принимает значение 30 с погрешностью  $\varepsilon = 0,23\%$ .

Дискретный характер величины  $m$  является причиной погрешности при определении  $m_a$ . Чем меньше погрешность  $\varepsilon$ , тем точнее результат вычислительного эксперимента будет соответствовать истинному значению  $P^f$ .

Процедура п. 7 определяет параметры отказов запорной арматуры и формирует массив параметров отказов  $\mathbf{M}^{31}$ .

Для системы на рис. 3.1 массив  $\mathbf{M}^{31}$  будет иметь размерность  $2 \times 24$  (табл. 3.4), для системы на рис. 3.2 – размерность  $2 \times 27$ , для системы на рис. 3.3 – размерность  $2 \times 30$ .

В отличие от табл. 2.4, которая рекомендуется универсальной методикой эксперимента, в табл. 3.4 отсутствует третья строка, поскольку она не несёт никакой полезной информации из-за равной продолжительности всех отказов  $\Delta t_k = const = 1 \text{ сымки}$ .

Таблица 3.4  
Значения параметров отказов запорной арматуры (массив  $\mathbf{M}^{31}$ )  
для системы на рис. 3.1

Индекс парам. $r$	Параметр	Индекс отказа $k$			
		1	2	...	24
1	Индекс места	$f_1^*$	$f_2^*$	...	$f_{24}^*$
2	Время наступления	$\tilde{t}_1^*$	$\tilde{t}_2^*$	...	$\tilde{t}_{24}^*$

В табл. 3.4 значение параметра  $f_k^*$  ( $k = \overline{1,24}$ ) определяется с помощью функции

$$f_k^* = \text{int}(q\tilde{x}_k + 1), \quad (3.10)$$

где  $q$  – количество задвижек в системе (для системы на рис. 3.1  $q = 8$ );  $\tilde{x}$  – случайная величина, получаемая в результате  $k$ -го обращения к генератору случайных чисел, равномерно распределённых в интервале от 0 до 1;  $\text{int}(\cdot)$  – функция взятия целой части числа.

Случайное значение параметра  $\tilde{t}_k^* \left( k = \overline{1,24} \right)$  определяется по формуле (2.13).

Процедура п. 8 не выполняется, поскольку является избыточной.

В связи с симметричностью структурной схемы для систем на рис. 3.1 – 3.3, выполнение всех последующих процедур (кроме последней, п.17) эквивалентно выполнению одной процедуры.

Для системы на рис. 3.1 схема алгоритма процедуры представлена на рис. 3.14.

Исходными данными для проведения процедуры является массив  $\mathbf{M}$  (табл. 3.5), который получается путём слияния массивов  $\mathbf{M}^T$  и  $\mathbf{M}^{31}$ .

В массивах  $\mathbf{M}^T$  и  $\mathbf{M}^{31}$  индексы трубопроводных участков  $t_i \left( i = \overline{1,4} \right)$  совпадают с индексами первых четырёх задвижек  $a_j \left( j = \overline{1,4} \right)$ . Поэтому слияние массивов  $\mathbf{M}^T$  и  $\mathbf{M}^{31}$  возможно только при предварительной переиндексации запорной арматуры.

С целью упрощения алгоритма переиндексацию для всех систем целесообразно проводить в соответствии с табл. 3.5. С той же целью объединённый массив дополняют ещё элементом  $m_{2,65} = 367$  (см. табл. 3.6). Элемент  $m_{1,65}$  в алгоритме не используется.

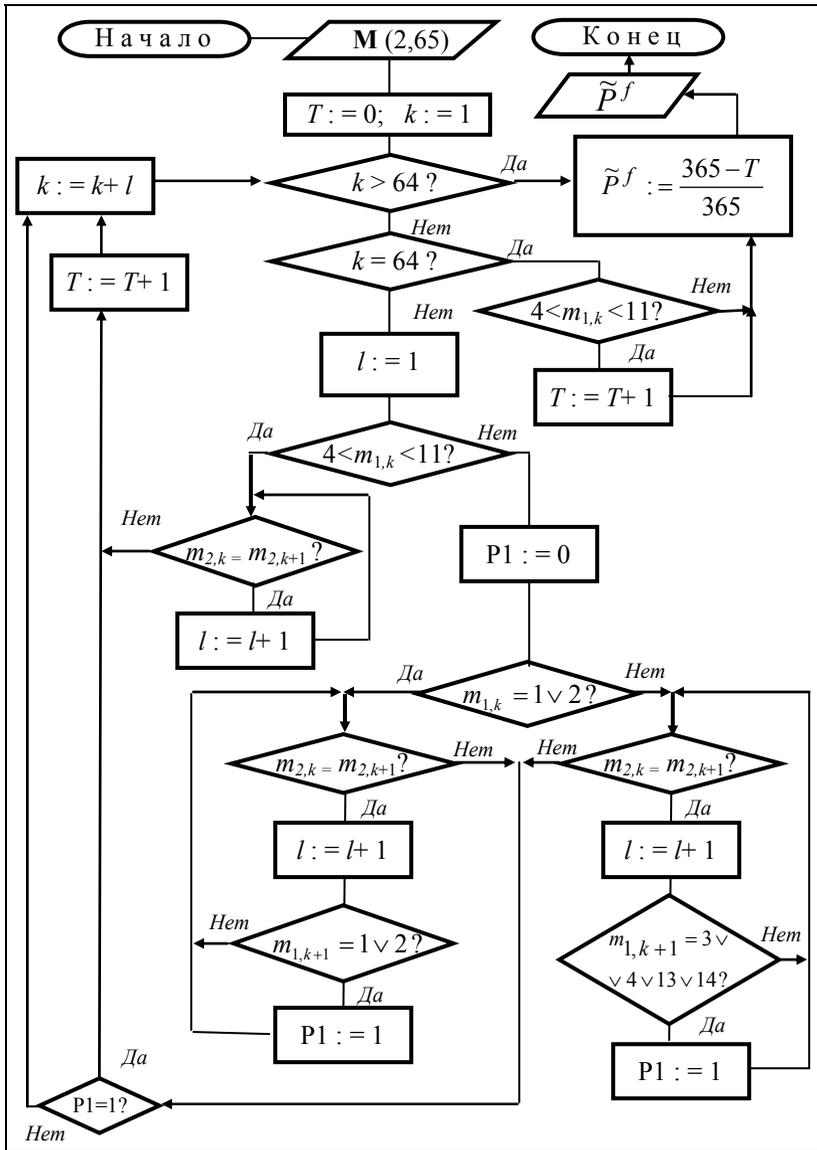


Рис. 3.14 – Схема алгоритма расчёта  $\tilde{P}^f$  по данным массива  $\mathbf{M}$

Таблица 3.5

Переиндексация запорной арматуры

Обозначение запорной арматуры	Старый индекс	Новый индекс
$a_1$	1	5
$a_2$	2	6
$a_3$	3	13
$a_4$	4	14
$a_5$	5	7
$a_6$	6	8
$a_7$	7	9
$a_8$	8	10
$a_9$	9	11
$a_{10}$	10	12

Таблица 3.6

Значения параметров отказов ( объединённый массив **M**)

Параметр	Индекс отказа $k$								
	1	2	...	40	41	42	...	64	65
Индекс места	$f_1$	$f_2$	...	$f_{40}$	$f_{41}$	$f_{42}$	...	$f_{64}$	*
Время наступления	$\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_2$	...	$\tilde{t}_{40}$	$\tilde{t}_{41}$	$\tilde{t}_{42}$	...	$\tilde{t}_{64}$	367

В табл. 3.6 фоном выделены ячейки, элементы которых формируются из элементов массива  $\mathbf{M}^{31}$  после переиндексации задвижек. Формирование выделенных ячеек осуществляется следующим образом:

$$f_{41} = f_1^*; \quad f_{42} = f_2^*; \quad \dots; \quad f_{64} = f_{24}^*;$$

$$\tilde{t}_{41} = \tilde{t}_1^*; \quad \tilde{t}_{42} = \tilde{t}_2^*; \quad \dots; \quad \tilde{t}_{64} = \tilde{t}_{24}^*.$$

Одноразовое выполнение программы по алгоритму на рис. 3.14 даёт случайное значение показателя функциональной надёжности  $\tilde{P}^{f_1}$ .

В соответствии с последней процедурой п.17  $n$ -кратное выполнение программы и определение показателя среднего значения  $P_{\text{ср.}}^{f_1}$  по формуле (2.1) позволяет увидеть тенденцию изменения  $P_{\text{ср.}}^{f_1}$  в зависимости от величины  $n$ .

Результаты вычислительного эксперимента по изложенному алгоритму представлены в виде табл. 3.7 и диаграммы на рис. 3.15.

Данные в табл. 3.7 и диаграмма зависимости  $P_{\text{ср.}}^{f_1}$  от числа экспериментов  $n$  на рис. 3.15 свидетельствуют об адекватности математической модели (3.6).

Аналогичные вычислительные эксперименты по проверке адекватности были проведены для математических моделей (3.7) и (3.8).

Схема алгоритма вычислительного эксперимента для модели (3.7), как и его результаты в виде таблицы и диаграммы, помещены в Приложении А «Вычислительный эксперимент ВЭ-3»; для модели (3.8) – в Приложении В «Вычислительный эксперимент ВЭ-4».

Таблица 3.7

Результаты вычислительного эксперимента ВЭ-2

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
1	0,945205	0,945205
2	0,945205	0,945205
3	0,947945	0,946119
4	0,942466	0,945205
5	0,953425	0,946849
6	0,939726	0,945662
7	0,953425	0,946771
8	0,942466	0,946233
9	0,936986	0,945205
10	0,956164	0,946301
20	0,950685	0,948356
30	0,953425	0,949315
40	0,958904	0,949726
50	0,953425	0,949753
60	0,953425	0,950000
70	0,939726	0,950333
80	0,950685	0,950753
90	0,950685	0,950715
100	0,945205	0,950466
200	0,947945	0,950466
300	0,947945	0,949799
400	0,945205	0,950041
500	0,950685	0,949825

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i^{f_1}$	$P_{\text{ср.}}^{f_1}$
600	0,939726	0,949991
700	0,947945	0,950239
800	0,939726	0,950240
900	0,934247	0,950137
1000	0,956164	0,950112
1100	0,947945	0,950182
1200	0,936986	0,950212
1300	0,947945	0,950122
1400	0,945205	0,950059
1500	0,945205	0,950026
1600	0,947945	0,949942
1700	0,950685	0,949979
1800	0,945205	0,949962
1900	0,945205	0,950030
2000	0,942466	0,949984
3000	0,950685	0,949980
4000	0,942466	0,949879
5000	0,945205	0,949850
6000	0,939726	0,949826
7000	0,956164	0,949779
8000	0,947945	0,949753
9000	0,945205	0,949784
10000	0,942466	0,949789

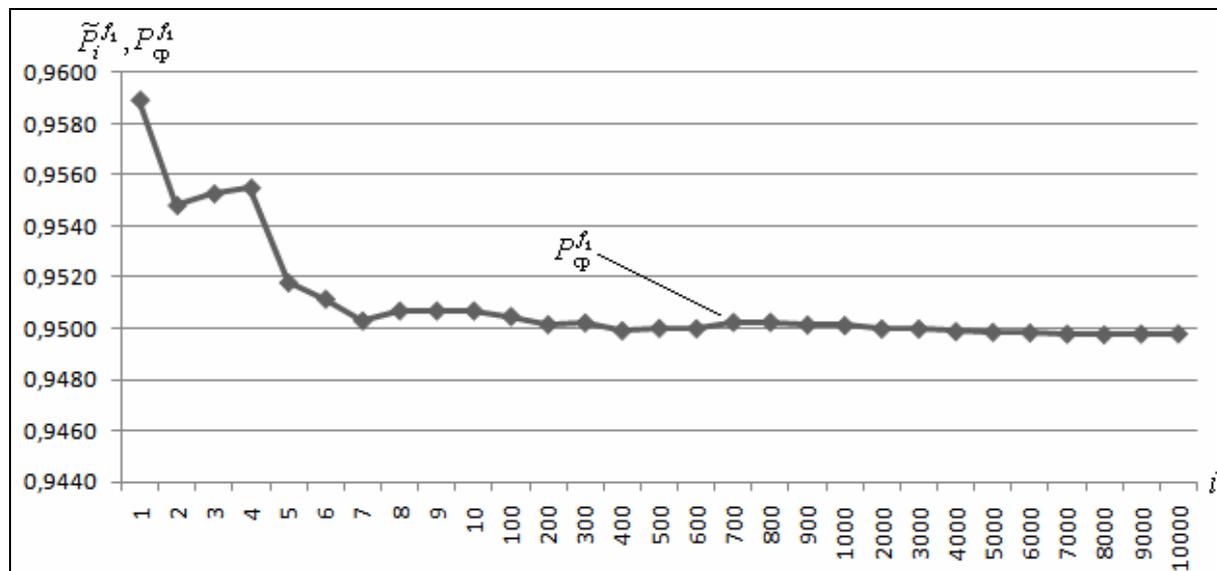


Рис. 3.15 – Диаграмма  $P_{\text{cp}}^{f_1}$  в зависимости от количества экспериментов  $i$

Отличия в структуре и составе систем на рис. 3.2 и 3.3 повлекли отличия и в алгоритмах соответствующих вычислительных экспериментов. Так, наличие шестой задвижки в перемычке системы на рис. 3.3 привело к усложнению алгоритма – вводу в алгоритм дополнительного фрагмента по циклической обработке объединенного массива параметров отказов **M**.

Таблицы результатов экспериментов и соответствующие диаграммы в приложениях свидетельствуют об адекватности моделей (3.7) и (3.8). Незначительные отклонения результатов эксперимента от расчётных значений объясняются вынужденным округлением числа отказов на запорной арматуре до целой величины. Для обеспечения полного совпадения результатов расчёта и эксперимента необходимо так подбирать параметры системы, участвующие в определении числа отказов, чтобы процедура округления отсутствовала.

Проведение вычислительных экспериментов по проверке адекватности математических моделей, полученных методом АРЗ, убедительно подтверждает теоретическую состоятельность самого метода АРЗ и правомерность его использования для получения адекватных математических моделей функциональной надёжности трубопроводных систем любой сложности.

## **Послесловие**

Настоящая монография является результатом научно-исследовательской работы, проводимой авторами в соответствии с задачами «Целевой комплексной программы развития транспортного комплекса Украины «Транспорт» (1992–2010 г.г.) и «Общегосударственной программы реформирования и развития жилищно-коммунального хозяйства на 2004–2010 г.г.», утверждённой Законом Украины от 24.06.2004 года, №1869–IV.

Информационной базой, послужившей отправной точкой в исследованиях и предпосылкой для получения нового научного результата, явились работы Рудя И.А. [22–23], Гавриленко И.А. [5–7, 34], Самойленко Н.И. [24–36], Сенчук Т.С. [27, 33, 36].

Основным научным результатом настоящей монографии является доказательство состоятельности аналитического метода (метода АРЗ) для расчёта показателя функциональной надёжности (вероятности бесперебойной поставки ЦП конкретному потребителю). Доказательство основано на виртуальном построении (цифровом моделировании) тестовых трубопроводных систем и проверке статистическими методами адекватности получаемых с помощью метода АРЗ математических моделей.

Основные практические результаты:

- разработка универсальной методики проверки адекватности аналитических моделей для расчёта вероятности бесперебойной поставки ЦП потребителям для систем со сложной структурой и разнородным составом трубопроводной сети;
- разработка упрощённой методики проверки адекватности аналитических моделей для расчёта вероятности бесперебойной поставки ЦП потребителям для простых трубопроводных систем.

Практическое значение проведенного исследования заключается в том, что

- конструкторы и проектировщики получают инструмент для создания, реконструкции и развития сложных трубопроводных систем (водопроводных, тепловых, газовых и др.) с высокой функциональной надёжностью;

– эксплуатационники трубопроводных систем получают инструмент для определения узких мест, т.е. участков или целых зон трубопроводной сети с недостаточной функциональной надёжностью;

– потребители сети получают критерий, позволяющий определять надёжность поставки ЦП и наиболее выгодные места подключения к трубопроводной сети.

Настоящая монография, как и работы Рудя И.А., Сенчук Т.С. и Гавриленко И.А., представляет собой отдельные фрагменты общей теории функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем, разрабатываемой на кафедре прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства.

Безусловно, проведенные исследования не исчерпывают всего комплекса задач, решение которых необходимо для окончательного формирования общей теории функциональной надёжности ТТС. К нерешённым или частично решённым задачам следует отнести:

- обобщение метода АРЗ на расчёт функциональной надёжности трубопроводной системы с двумя и более источниками ЦП;
- определение предельно допустимых параметров трубопроводных систем при заданных ресурсах и условиях, в том числе – оптимального количества перемычек в магистральных системах;
- цифровое моделирование методов расчёта и др.

Разработка общей теории функциональной надёжности предоставляет обширное поле деятельности для ученых и производителей. Только аналитический «урожай» с этого поля позволит автоматизировать процессы проектирования, эксплуатации и развития ТТС с учётом их функциональной надёжности.

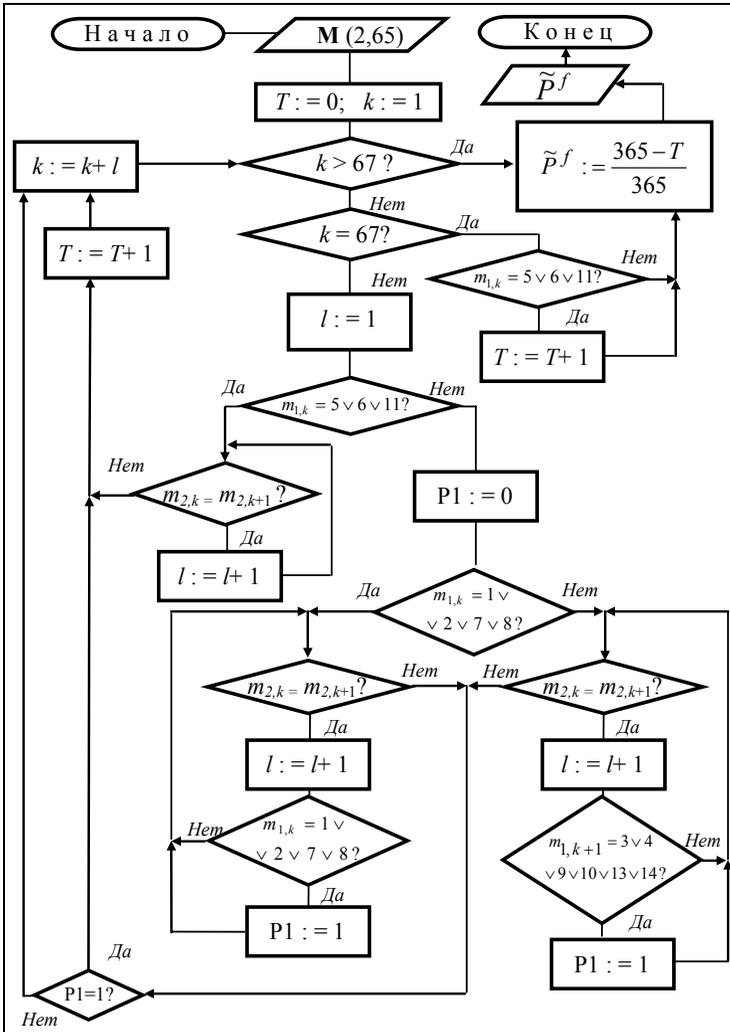
Общая теория функциональной надёжности ждёт своих исследователей, и прежде всего – молодых!

*Проф., д-р техн. наук Самойленко Н.И.*

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А. Вычислительный эксперимент ВЭ-3

### Схема алгоритма расчёта $\tilde{P}^{f_2}$



**Таблица результатов вычислительного эксперимента ВЭ-3**

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i f_2$	$P_{\text{ср.}} f_2$
1	2	3
1	0,975342	0,975342
2	0,972603	0,973973
3	0,980822	0,976256
4	0,972603	0,975342
5	0,972603	0,974795
6	0,983562	0,976256
7	0,989041	0,978082
8	0,980822	0,978425
9	0,980822	0,978691
10	0,956164	0,976438
11	0,978082	0,976588
12	0,978082	0,976712
13	0,964384	0,975764
14	0,975342	0,975734
15	0,961644	0,974795
16	0,975342	0,974829
17	0,964384	0,974214
18	0,969863	0,973973
19	0,972603	0,973901
20	0,989041	0,974658
21	0,972603	0,974560
22	0,964384	0,974097
23	0,964384	0,973675
24	0,967123	0,973402

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i f_2$	$P_{\text{ср.}} f_2$
1	2	3
25	0,975342	0,973479
26	0,964384	0,973130
27	0,972603	0,973110
28	0,961644	0,972701
29	0,961644	0,972319
30	0,983562	0,972694
31	0,961644	0,972338
32	0,969863	0,972260
33	0,958904	0,971856
34	0,969863	0,971797
35	0,975342	0,971898
36	0,969863	0,971842
37	0,980822	0,972084
38	0,969863	0,972026
39	0,969863	0,971970
40	0,983562	0,972260
41	0,975342	0,972335
42	0,983562	0,972603
43	0,989041	0,972985
44	0,972603	0,972976
45	0,969863	0,972907
46	0,972603	0,972901
47	0,958904	0,972603
48	0,975342	0,972660

Приложение

Продолжение таблицы

1	2	3
49	0,975342	0,972715
50	0,972603	0,972712
51	0,961644	0,972495
52	0,964384	0,972339
53	0,975342	0,972396
54	0,961644	0,972197
55	0,983562	0,972403
56	0,956164	0,972114
57	0,961644	0,971930
58	0,972603	0,971941
59	0,975342	0,971999
60	0,958904	0,971781
61	0,967123	0,971704
62	0,969863	0,971675
63	0,975342	0,971733
64	0,975342	0,971789
65	0,980822	0,971928
66	0,986301	0,972146
67	0,975342	0,972194
68	0,980822	0,972321
69	0,972603	0,972325
70	0,975342	0,972368
71	0,967123	0,972294
72	0,956164	0,972070

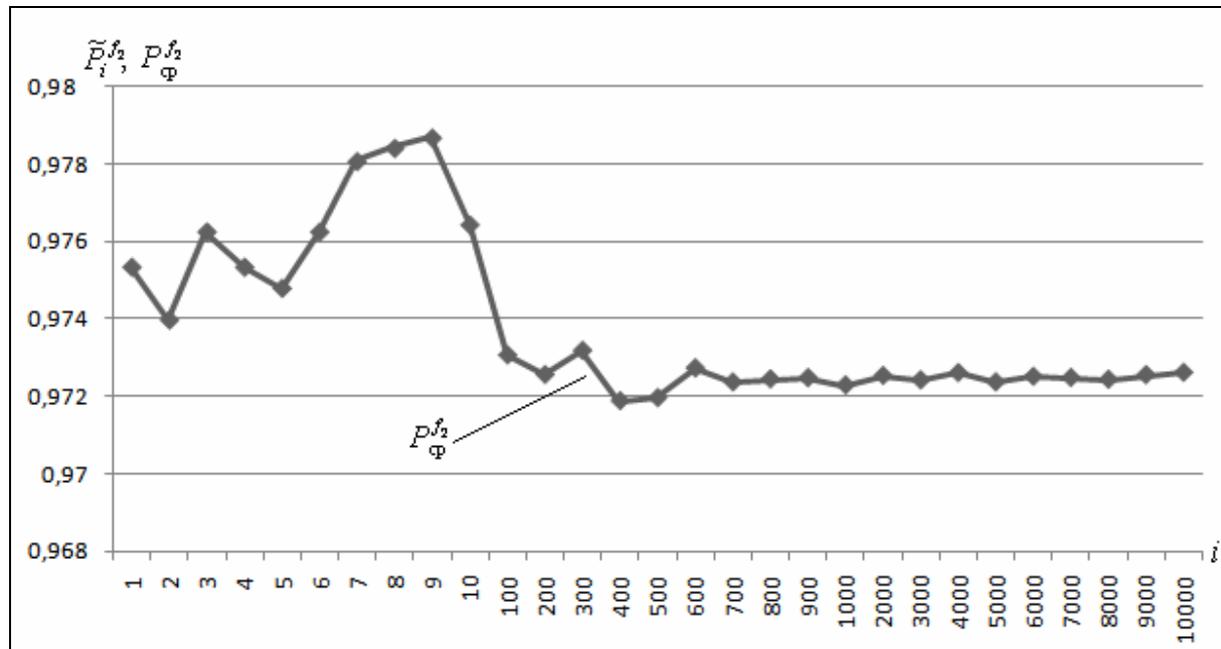
1	2	3
73	0,983562	0,972227
74	0,975342	0,972270
75	0,983562	0,972420
76	0,969863	0,972386
77	0,969863	0,972354
78	0,972603	0,972357
79	0,972603	0,972360
80	0,980822	0,972466
81	0,983562	0,972603
82	0,978082	0,972670
83	0,986301	0,972834
84	0,972603	0,972831
85	0,975342	0,972861
86	0,978082	0,972921
87	0,964384	0,972823
88	0,978082	0,972883
89	0,972603	0,972880
90	0,980822	0,972968
91	0,986301	0,973115
92	0,975342	0,973139
93	0,972603	0,973133
94	0,969863	0,973098
95	0,972603	0,973093
96	0,972603	0,973088

Продолжение таблицы

1	2	3
97	0,975342	0,973111
98	0,983562	0,973218
99	0,969863	0,973184
100	0,961644	0,973068
200	0,972603	0,972562
300	0,978082	0,973187
400	0,969863	0,971884
500	0,969863	0,971962
600	0,978082	0,972735
700	0,975342	0,972368
800	0,975342	0,972449
900	0,978082	0,972481
1000	0,978082	0,972293
1100	0,961644	0,972207
1200	0,972603	0,972564
1300	0,969863	0,972289
1400	0,956164	0,972162
1500	0,969863	0,972376
1600	0,975342	0,972604
1700	0,969863	0,972200
1800	0,975342	0,972577
1900	0,975342	0,972446
2000	0,975342	0,972538
3000	0,980822	0,972423

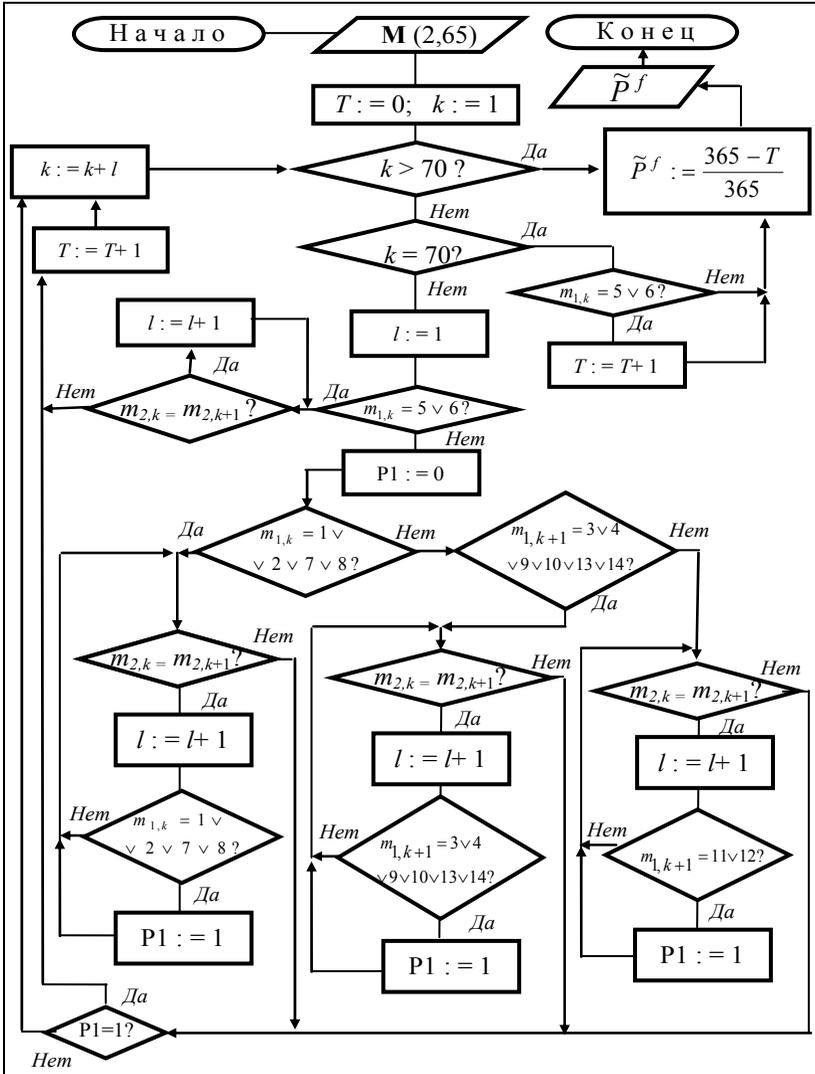
1	2	3
4000	0,972603	0,972613
5000	0,972603	0,972370
6000	0,975342	0,972516
7000	0,969863	0,972487
8000	0,969863	0,972441
9000	0,964384	0,972559
10000	0,967123	0,972618

Диаграмма зависимости  $P_{\text{ср.}}^{f_2}$  от числа экспериментов  $i$



Приложение В. Вычислительный эксперимент ВЭ-4

Схема алгоритма расчёта  $\tilde{P}^f$



Приложение

**Таблица результатов вычислительного эксперимента ВЭ-4**

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i f_3$	$P_{\text{ср.}} f_3$
1	2	3
1	0,980822	0,980822
2	0,969863	0,975342
3	0,980822	0,977169
4	0,969863	0,975342
5	0,989041	0,978082
6	0,983562	0,978995
7	0,980822	0,979256
8	0,975342	0,978767
9	0,978082	0,978691
10	0,975342	0,978356
11	0,983562	0,978829
12	0,975342	0,978539
13	0,972603	0,978082
14	0,983562	0,978474
15	0,975342	0,978265
16	0,978082	0,978253
17	0,969863	0,977760
18	0,986301	0,978234
19	0,986301	0,978659
20	0,991781	0,979315
21	0,986301	0,979648
22	0,972603	0,979328
23	0,986301	0,979631
24	0,967123	0,979110

Кол-во эксп. $i$	$\tilde{P}_i f_3$	$P_{\text{ср.}} f_3$
1	2	3
25	0,983562	0,979288
26	0,983562	0,979452
27	0,980822	0,979503
28	0,978082	0,979452
29	0,983562	0,979594
30	0,983562	0,979726
31	0,989041	0,980027
32	0,978082	0,979966
33	0,989041	0,980241
34	0,989041	0,980500
35	0,983562	0,980587
36	0,980822	0,980594
37	0,975342	0,980452
38	0,980822	0,980461
39	0,975342	0,980330
40	0,989041	0,980548
41	0,986301	0,980688
42	0,975342	0,980561
43	0,969863	0,980312
44	0,980822	0,980324
45	0,972603	0,980152
46	0,969863	0,979929
47	0,980822	0,979948
48	0,972603	0,979795

Продолжение таблицы

1	2	3
49	0,972603	0,979648
50	0,989041	0,979836
51	0,991781	0,980070
52	0,980822	0,980084
53	0,989041	0,980253
54	0,972603	0,980112
55	0,972603	0,979975
56	0,975342	0,979892
57	0,989041	0,980053
58	0,980822	0,980066
59	0,986301	0,980172
60	0,972603	0,980046
61	0,978082	0,980013
62	0,969863	0,979850
63	0,972603	0,979735
64	0,980822	0,979752
65	0,997260	0,980021
66	0,980822	0,980033
67	0,978082	0,980004
68	0,980822	0,980016
69	0,986301	0,980107
70	0,980822	0,980117
71	0,978082	0,980089
72	0,975342	0,980023

1	2	3
73	0,972603	0,979921
74	0,983562	0,97997
75	0,975342	0,979909
76	0,975342	0,979849
77	0,989041	0,979968
78	0,980822	0,979979
79	0,975342	0,97992
80	0,972603	0,979829
81	0,969863	0,979706
82	0,980822	0,979719
83	0,978082	0,979700
84	0,986301	0,979778
85	0,980822	0,979790
86	0,991781	0,979930
87	0,978082	0,979909
88	0,975342	0,979857
89	0,986301	0,979929
90	0,986301	0,980000
91	0,972603	0,979919
92	0,986301	0,979988
93	0,975342	0,979938
94	0,978082	0,979918
95	0,969863	0,979813
96	0,986301	0,979880

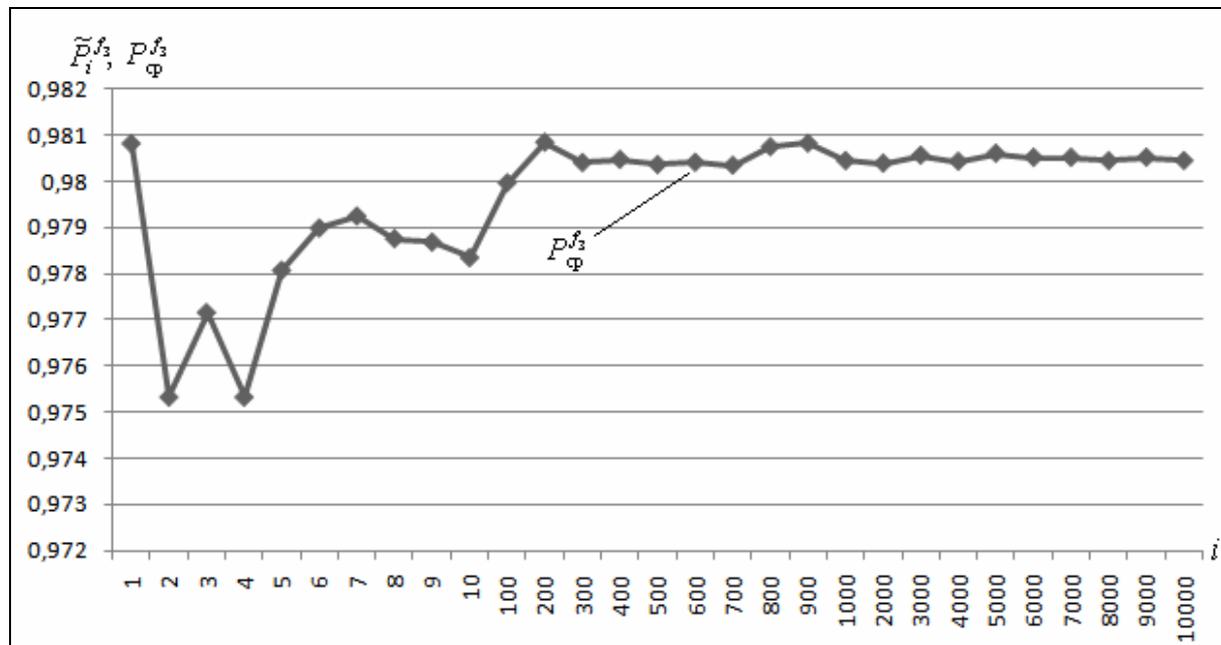
Приложение

Продолжение таблицы

1	2	3
97	0,986301	0,979946
98	0,969863	0,979843
99	0,983562	0,979881
100	0,989041	0,979973
200	0,980822	0,980849
300	0,978082	0,980411
400	0,972603	0,980479
500	0,980822	0,980367
600	0,989041	0,980416
700	0,975342	0,980352
800	0,986301	0,980753
900	0,980822	0,980828
1000	0,989041	0,980452
1100	0,972603	0,980531
1200	0,978082	0,980523
1300	0,972603	0,980424
1400	0,978082	0,980671
1500	0,983562	0,980429
1600	0,980822	0,980800
1700	0,980822	0,980538
1800	0,978082	0,980588
1900	0,989041	0,980572
2000	0,980822	0,980397
3000	0,986301	0,980569

1	2	3
4000	0,975342	0,980438
5000	0,980822	0,980613
6000	0,986301	0,980523
7000	0,980822	0,980523
8000	0,980822	0,980451
9000	0,986301	0,980526
10000	0,983562	0,980454

Диаграмма зависимости  $P_{\text{ср.}}^{f_3}$  от числа экспериментов  $i$



## Список использованной литературы

1. *Абрамов Н.Н.* Теория расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
2. *Абрамов Н.Н., Поспелов М.М.* Расчёт водопроводных сетей. – М.: Госстройиздат, 1962. – 227 с.
3. *Беляев Ю.К.* Статистические методы в теории надежности. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
5. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С.195–199.
6. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Расчёт надёжности поставки целевого продукта конкретному потребителю в системах трубопроводного транспорта // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2006. – Вып. 67. – С.222–228.
7. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и проектирование систем тепло-, газо- и водоснабжения с учетом надежности // II Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения жилищно-коммунального хозяйства». – Алушта, ХО НТТ КГ и ПО, ХНАГХ, 2006. – С. 77-79.
8. *Гальперин Е.М.* Расчёт кольцевых водопроводных сетей с учётом надёжности функционирования. – Саратов: Саратовский ГУ, 1989. – 104 с.
9. *Душкин С.С., Краев И.О.* Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения. – К., 1993.–164 с.
10. *Евдокимов А.Г.* Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков: Вища шк., 1980. – 208 с.
11. *Евдокимов А.Г., Панасенко А.А.* Оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – Харьков: Основа, 1996.–136 с.
12. *Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.* Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Х.: Вища школа, 1980. – 144 с.
13. *Ильин Ю.А.* Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
14. *Ильин Ю.А.* Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.

15. *Ионин А.А.* Надёжность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
16. *Ионин А.А.* Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989.– 439 с.
17. *Коваленко И.Н.* Исследования по анализу надёжности сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1976. – 211 с.
18. *Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю.* Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
19. *Петросов В.А.* Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.
20. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. Т.1. Компьютеризация в системах водоснабжения / Под ред. *Евдокимова А.Г и Самойленко Н.И.* – Харьков: ХТУРЭ, 1997. – 276 с.
21. *Рудь И.А.* Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности. – Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.
22. *Рудь И.А.* Модели надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Радиоэлектроника и информатика, Харьков, 2000. №3 – С.86-87.
23. *Рудь И.А.* Расчёт надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 1999. – Вып. 20. – Ч.1. – С.37–42.
24. *Рудь И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и развитие инженерных сетей с учётом надёжности // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы II Международной междисциплинарной НПК. – Харьков, 2001. – С.142–143.
25. *Самойленко Н.И.* Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов / Мальцев В.П., Евдокимов А.Г., Самойленко Н.И., Шавлов А.Т. - Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. – 232 с.
26. *Самойленко Н.И.* Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития инженерных сетей. – Дис...д-ра техн. наук: 05.13.02; 05.13.04. – Харьков, 1996. – 370 с.
27. *Самойленко Н.И.* Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем : Монография / Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. : Харьков: НТМТ, ХНАГХ, 2009. – 276 с.
28. *Самойленко Н.И.* Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем : Монография / Самойленко Н.И., Гавриленко И.А. : ХНАГХ. – Горловка : ЧП «Видавництво Ліхтар», 2008. – 180 с.

## Литература

29. *Самойленко М.І.* Функціональна надійність трубопровідних трубопровідних транспортних систем : Монографія / Самойленко М.І., Гавриленко І.О. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 184 с.

30. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Анализ функциональной надёжности различных конструкций магистральных трубопроводов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.197–203.

31. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем // Устойчивое развитие городов. Материалы VI Международной НПК. – Харьков: ХНАХ, 2008.

32. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А., Передерий Т.С.,* Повышение надёжности функционирования магистрального трубопровода // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка, 2006. – Вып. 72. – С.193-200.

33. *Сенчук Т.С., Самойленко Н.И.* Резервирование магистральных трубопроводов как средство повышения функциональной надёжности // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.219–227.

34. *Gavrilenko I.A., Samoilenko M.I.* Functional Reliability Calculation of Complex Pipe-Line Transport System / Materials of 8-th European Conference “TRANSCOM 2009”. Slovak Republic, Gilina, 2009. – P. 73-76.

35. *Samoilenko M.I.* On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. Hamburg, 1995.

36. *Senchuk T., Samoilenko M.* The Method of Mathematical Model Plotting of System Functional Reliability / Materials of 8-th European Conference “TRANSCOM 2009”. Slovak Republic, Gilina, 2009. – P. 233-236.

**Наукове видання**

**САМОЙЛЕНКО Микола Іванович,  
КОСТЕНКО Олександр Борисович,  
СЕНЧУК Тетяна Сергіївна,  
ГАВРИЛЕНКО Ірина Олександрівна,  
ЛОБАН Олександра Василівна**

**АДЕКВАТНІСТЬ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ  
НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ**

**Монографія**  
(рос. мовою)

Відповідальний за випуск – Самойленко М.І.  
Комп'ютерна верстка – Самойленко М.І.  
Програмне забезпечення – Сенчук Т.С.  
Технічне редагування – Костенко О.Б.

Видавництво «НТМТ»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 1748 від 15.04.2004 р.  
61072, м. Харків, пр. Леніна, 58, к. 106.

Підписано до друку 1.10.2009.  
Формат 60x84/16. Папір 80 г/м<sup>2</sup>.  
Умов.-друк. арк. –7,2. Обл.-вид. арк. – 8,3.  
Тираж 300 примірників.

---

Напечатано в типографії ООО «Современная печать» на цифровом  
лазерном издательском комплексе Rank Xerox DocuTech 135.

Адрес: г. Харьков, ул. Лермонтовская, 27.

Телефон (057) 752-47-90