

УДК 004.4+51-37

ББК 73.22.1

ЭКСПЕРТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Андреев А. К.¹, Камаев Д. А.²

(Государственное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Федеральный информационно-аналитический Центр Росгидромета, г. Обнинск)

Трахтенгерц Э. А.³

(Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

В настоящей работе изложены принципы функционирования и архитектура системы, которая предназначена для прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: Прогнозирование, системы жизнеобеспечения, цунами, система поддержки принятия решений.

1. Введение

Современные города имеют сложную совокупность систем жизнеобеспечения, поддерживающую необходимые санитарно-

¹ Андреев Алексей Константинович, аспирант, (48439)4-49-50, aka@feerc.obninsk.org.

² Камаев Дмитрий Альфредович, доктор технических наук, (48439)4-49-50, kda@feerc.obninsk.org.

³ Трахтенгерц Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, профессор, (495)334-88-40, tracht@ipu.rssi.ru.

гигиенические условия, а также условия для труда, быта и отдыха населения. Система жизнеобеспечения города включает в себя системы: водоснабжения, канализации, газоснабжения, связи, электроснабжения, теплоснабжения, мусороудаления и другие системы для обслуживания жилых и промышленных районов. Для большинства из этих систем характерно наличие источника, для эксплуатации которого создаются специальные сооружения, и трассы инженерных коммуникаций (сетей), обеспечивающих доставку потребителям воды, газа, тепла и т.д. Большинство инженерных сетей города имеют свою структуру и подразделяются на питающие водопроводы, теплосети, линии электропередач и т.д., идущие от источника питания до мест присоединения к распределяющим сетям; распределяющие сети; разводящие сети, идущие от мест присоединения к распределяющим сетям до потребителей; отводящие сети, которые делятся на принимающие, собирающие и отводящие. Все названное многообразие систем жизнеобеспечения может функционировать при условии специально организованного взаимодействия друг с другом.

В условиях возникновения чрезвычайной ситуации, обусловленной явлениями природного и техногенного характера, системы жизнеобеспечения испытывают воздействия, которые могут вызвать их повреждения и нарушить нормальное функционирование, что, в свою очередь, может привести к тяжелым последствиям для населения. Прогнозирование последствий повреждения систем жизнеобеспечения является важной задачей при планировании мероприятий по защите населения в чрезвычайных ситуациях.

Системы жизнеобеспечения представляют собой сложные структуры, поэтому комплексное прогнозирование их поведения в условиях чрезвычайной ситуации на основе аналитических моделей, как правило, невозможно из-за отсутствия адекватных моделей, охватывающих все виды систем жизнеобеспечения и учитывающие их взаимодействие. Альтернативным подходом к проблеме прогнозирования поведения

систем жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации является подход, опирающийся на реализацию компьютерных систем, для которых экспертные знания и оценки, также как и фактические измерения, являются входными данными, способными согласовывать несовпадающие мнения экспертов и на основании этих данных оценивать последствия чрезвычайных ситуаций.

В настоящей работе изложены принципы функционирования и архитектура системы, которая предназначена для прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием цунами.

2. Прогнозирование состояния системы жизнеобеспечения

В рамках настоящей разработки система жизнеобеспечения населения рассматривается как совокупность взаимодействующих подсистем жизнеобеспечения (ПСЖ). Вследствие возникновения чрезвычайной ситуации каждая ПСЖ может подвергнуться неблагоприятным воздействиям, которые приведут к потере ряда функций. Неблагоприятные воздействия на ПСЖ могут иметь причиной как само стихийное бедствие, так и нарушение функционирования связанных с ней ПСЖ.

Система может использоваться для решения следующих задач:

- прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами;
- моделирования возможных состояний системы жизнеобеспечения, которые могут возникнуть в результате реализации гипотетических сценариев воздействия волн цунами.

Первая задача решается с помощью системы в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами. Результаты решения используются для оперативной организации мероприятий по обеспечению безопасности населения и

хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшению возможного ущерба от цунами.

Вторая задача возникает при составлении предварительных планов проведения работ по обеспечению безопасности населения и хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшению возможного ущерба от цунами. Использование системы позволяет осуществить анализ возможных последствий воздействия волн цунами на систему жизнеобеспечения населения. Такой анализ позволяет выделить типичные сценарии воздействия цунами и последствий и осуществлять на их основе разработку предварительных планов.

При прогнозировании состояния системы жизнеобеспечения в системе применяется подход, опирающийся на использование экспертной информации. Получение и ввод в компьютерную систему экспертной информации выполняется на подготовительном этапе при помощи специального модуля (его функционирование подробно описано в разделе 4). На подготовительном этапе осуществляется формирование на основе экспертной информации исходных данных для выполнения процедур прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения, которые включают: схемы инфраструктуры подсистем жизнеобеспечения; информацию, характеризующую влияние элементов инфраструктуры; схемы технологических процессов подсистем жизнеобеспечения; множество возможных факторов воздействия на элементы инфраструктуры; таблицы весов факторов воздействия для элементов инфраструктуры; технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования; технологические характеристики операций и их зависимость от состояния элементов.

Объем используемых экспертных данных значителен и не может вводиться одним экспертом, так как требует специальных знаний, всей совокупностью которых отдельный эксперт может не обладать. Кроме того, введение большого объема данных одним экспертом может сопровождаться ошибками. По этим

причинам в системе применяются процедуры группового экспертного оценивания и согласования экспертных оценок.

Результаты прогнозирования в значительной степени зависят от используемой экспертной информации. Для оценки влияния экспертных оценок на результаты прогнозирования в системе предусмотрена возможность варьирования вводимых экспертных данных. Оценка влияния экспертной информации на результаты прогнозирования осуществляется при настройке системы, а также при решении задач предварительного планирования.

Схема функционирования системы приведена на рис. 2.1.

При использовании системы в условиях возникшей чрезвычайной ситуации в систему вводятся данные о чрезвычайной ситуации – выполняется этап ЧС на рис. 2.1. В режиме аварийного планирования, когда осуществляется анализ возможных состояний системы жизнеобеспечения населения вследствие воздействия волн цунами, в систему вводятся гипотетические данные о чрезвычайной ситуации – выполняется этап А, см. рис. 2.1.

Будем рассматривать взаимодействие шести подсистем жизнеобеспечения $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$, соединенных между собой средствами коммуникаций (кабели, газопроводы и т.п., которые рассматриваются как отдельные ПСЖ или включаются составной частью в соответствующие ПСЖ) и образующих систему жизнеобеспечения населения в месте проживания, см. рис. 2.2.

В качестве примера ПСЖ рассмотрим подсистему водоснабжения, именуемую в дальнейшем «Водоканал», см. рис. 2.3.

При оценке последствий воздействия волны цунами у каждой ПСЖ рассматривается её инфраструктура и процесс функционирования (технологический процесс). Элементы инфраструктуры – это материальные фрагменты ПСЖ, например здания, оборудование, инженерные сооружения и т.п. При этом считается, что элемент инфраструктуры может испытывать воздействие волны цунами, которое приводит к нарушению его

функционирования. Кроме того, нарушение функционирования элемента инфраструктуры ПСЖ может иметь причиной нарушение функционирования другого элемента инфраструктуры.



Рис. 2.1. Схема функционирования системы

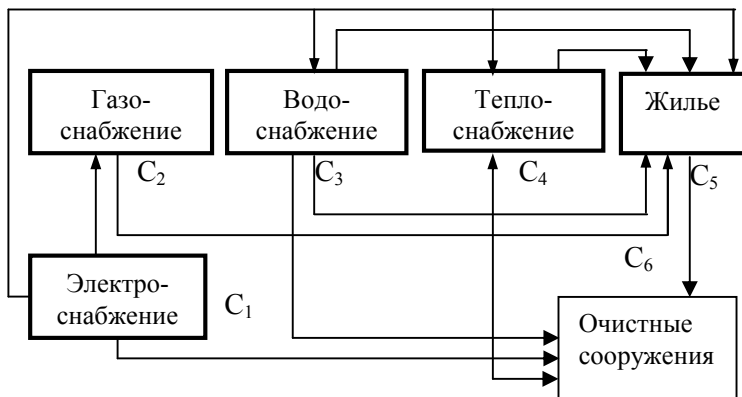


Рис. 2.2. Схема системы жизнеобеспечения

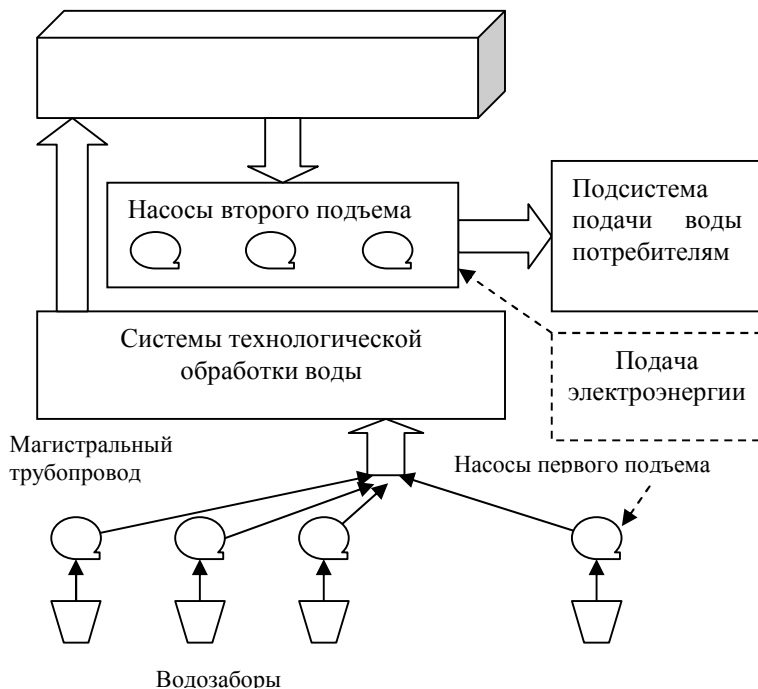


Рис. 2.3. Подсистема водоснабжения

В системе используется представление инфраструктуры в виде «схемы инфраструктуры», формируемой на основе экспертных знаний и представляющей собой ориентированный граф. Вершины в графе соответствуют некоторым блокам элементов инфраструктуры, а ребра – связям между блоками элементов. Наличие в графе ориентированного ребра, идущего из одной вершины в другую, означает, что повреждение в соответствующем первой вершине блоке элементов инфраструктуры вызывает повреждение в блоке элементов, соответствующем второй вершине. Действия экспертов в процессе формирования «схемы инфраструктуры» заключаются в объединении элементов инфраструктуры ПСЖ в блоки таким способом, чтобы полученная в результате схема инфраструктуры была отображением инфраструктуры в виде крупных блоков (процедура построения схемы инфраструктуры приведена в разделе 4.1), см. рис. 2.4.

В схеме инфраструктуры ПСЖ «Водоканал» имеются связи (a_1, a_4) , (a_2, a_4) , (a_3, a_4) , (a_8, a_9) между вершинами. Это означает, что повреждение элемента инфраструктуры «Станция технологической обработки воды» может вызвать повреждение элемента «Резервуар чистой воды» вследствие конструктивных особенностей рассматриваемой ПСЖ: резервуар чистой воды расположен внутри станция технологической обработки. Аналогично, из-за конструктивных особенностей повреждения водозаборов вызывают повреждения насосной станции первого подъема. Остальные элементы инфраструктуры ПСЖ «Водоканал» независимы, т.е. повреждение каждого из них не вызывает повреждений других элементов.

Представление технологического процесса ПСЖ в системе осуществляется в виде «схемы технологического процесса ПСЖ», которая является ориентированным ациклическим графом. Вершины графа соответствуют технологическим этапам (операциям), а ребра – связям между этапами. Ориентация ребер задает последовательность выполнения этапов. Схема технологического процесса формируется экспертами и строится так,

чтобы полученная в результате схема была изображением технологического процесса ПСЖ в виде последовательности операций, см. рис. 2.5.

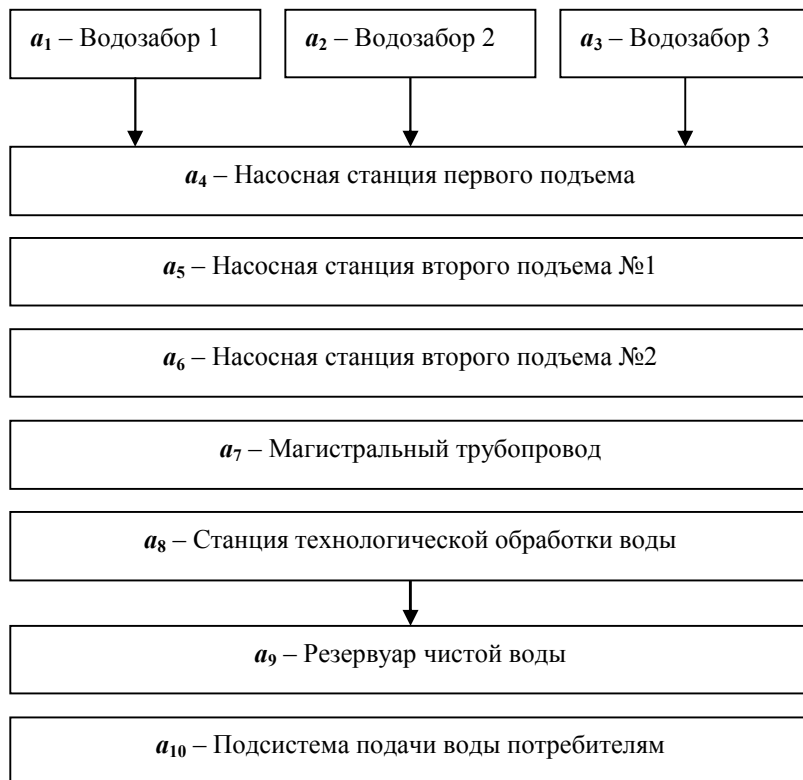


Рис. 2.4. Схема инфраструктуры ПСЖ «Водоканал»

Двойные стрелки обозначают подачу электроэнергии, требующейся для выполнения технологических операций, а также подачу воды потребителям (операция A_7).

При оценке последствий воздействия цунами считается, что волны цунами могут вызывать повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ, что, в свою очередь, приводит к нарушениям в осуществлении технологического процесса и, тем самым, сни-

жению качества функционирования ПСЖ в целом. Для оценки воздействия цунами на элементы инфраструктуры в системе введено множество факторов воздействия. С помощью наборов факторов воздействия задается сценарии чрезвычайной ситуации, обусловленной воздействием цунами. Множество факторов воздействия формируется на основе экспертных знаний.



Рис. 2.5. Схема технологического ПСЖ «Водоканал»

В дальнейшем всюду термин «элемент схемы инфраструктуры» означает блок элементов инфраструктуры ПСЖ, а термин «операция технологического процесса» означает операцию в схеме технологического процесса.

3. Описание этапов процедуры прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения

В предшествующем разделе в общих чертах приведена схема процедуры прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения (рис. 2.5). В настоящем разделе приводится подробное описание используемых схем, понятий и величин. Необходимая для функционирования системы экспертная, техническая и технологическая информация вводится в систему при помощи процедур, изложенных в разделе 4.

3.1. ФОРМИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА НАБОРА ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Множество факторов воздействия $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$ представлено в системе в виде списка, который формируется на основе экспертных знаний. Каждый фактор воздействия описывается текстовым предложением и может содержать количественные показатели.

Пример множества факторов воздействия.

Территория населенного пункта разделяется на зоны $\{W_1, \dots, W_h\}$. Для каждой зоны введены оценки следующих параметров волн цунами:

h_{\max} – максимальная глубина затопления от волны цунами, м;

V_{\max} – максимальная скорость течения воды в волне, м/с;

t – температура воды в волне, град.;

T – время существования волны (продолжительность затопления), ч.

Для каждого из перечисленных параметров введена дискретная шкала значений. Произвольный фактор воздействия представлен в системе в виде набора $(W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$ и предъявляется эксперту (пользователю) в виде текстового предложения:

«В зоне W_i наблюдаются следующие значения параметров волн цунами: максимальная глубина затопления от волны цунами – h_{\max} , м; максимальная скорость течения воды в волне – V_{\max} , м/с; температура воды в волне – t , град.; время существования волны (продолжительность затопления) – T , ч.»

Для описания повреждения элементов a инфраструктуры ПСЖ вводится величина $d(a)$ – «степень повреждения элемента a », которая оценивается в лингвистической шкале, см. таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Шкала оценки степени повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ

Лингвистическая шкала	Числовая оценка	Комментарий
«повреждение отсутствует»	0	Элемент инфраструктуры не подвергся воздействию или воздействие незначительно.
«среднее повреждение»	1	Воздействие на элемент инфраструктуры вызвало значительные повреждения оборудования.
«полное разрушение»	2	Воздействие на элемент инфраструктуры привело к полному разрушению.

Точный смысл выражений «повреждение отсутствует», «среднее повреждение», «полное разрушение» устанавливается экспертами для каждого элемента инфраструктуры индивидуально. Например, для элемента инфраструктуры «Станция

технологической обработки воды» (рис. 2.3) смысл элементов шкалы оценок степени повреждения приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Шкала оценки степени повреждения элемента «Станция технологической обработки воды»

Лингвистическая шкала	Комментарий
«повреждение отсутствует»	Оказанное воздействие незначительно или совсем отсутствует, так что технологическое оборудование не пострадало.
«среднее повреждение»	Воздействие волны цунами вызвало повреждения: а) части установок фильтрации воды; б) части насосов подачи воды; в) (В пунктах а), б), в) ... приводится описание ситуаций, которые могут сложиться в результате воздействия)
«полное разрушение»	Воздействие на элемент инфраструктуры привело к полному разрушению здания станции и оборудования.

Для каждого фактора воздействия Φ_{ξ} и элемента a инфраструктуры ПСЖ в системе зафиксированы значения двух величин: $d(a, \Phi_{\xi})$, $\varphi_{\xi}(a)$ – степени повреждения элемента инфраструктуры ПСЖ (по шкале в таблице 3.1) и веса воздействия фактора Φ_{ξ} на элемент инфраструктуры соответственно. При этом для любого a должно выполняться условие (1):

$$(1) \sum_{\xi} \varphi_{\xi}(a) = 1.$$

Для приведенного выше примера множества факторов воздействия вес $\varphi_{\xi}(a)$ фактора $\Phi_{\xi} = (W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$ равен 1, если элемент инфраструктуры $a \in W_i$, и 0 в противном случае.

Значения степеней повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ и весов воздействия факторов устанавливаются на

основе технических характеристик элементов инфраструктуры или на основе знаний экспертов. Например, для зданий, являющихся элементами инфраструктуры, используются эмпирические знания о критических значениях параметров волн цунами, вызывающих повреждение различной тяжести, см. таблицу 3.3. Таким образом, для элемента инфраструктуры a = «трансформаторная подстанция» и фактора Φ_{ξ} со значениями $h_{max} = 6$ м, $V_{max} = 3$ м/с, $d(a, \Phi_{\xi}) = 2$

Таблица 3.3. Параметры волн цунами, вызывающих повреждение зданий различных типов

№ п/п	Тип здания	Полное разрушение		Среднее повреждение	
		h_{max} , м	V_{max} м/с	h_{max} , м	V_{max} м/с
1.	Лёгкие 1-2 этажные бескаркасные постройки	3,5	2	3	1,5
2.	Промышленные здания с лёгким металлическим каркасом и здания бескаркасной постройки	5	2,5	3,5	2
3.	Промышленные здания с тяжёлым металлическим или железобетонным каркасом (стены из керамзитобетонных панелей)	7,5	4	6	3
4	Бетонные и железобетонные здания, здания антисейсмической конструкции	12	4	9	3
5	Трансформаторные подстанции	5	2	4	2
...

Процедура оценки набора значимых факторов воздействия чрезвычайной ситуации на инфраструктуры отдельных подсистем жизнеобеспечения выполняется следующим образом (подробно процедура приведена в разделе 4.3). По информации о процессе наката волны цунами на береговую зону, которая получена на основе моделирования или непосредственного наблюдения и представлена экспертам, компьютерная система определяет Ξ – множество элементов инфраструктуры ПСЖ, которые могут подвергнуться прямому воздействию волн цунами. Фактор Φ_ξ включается в множество значимых (в складывающейся ситуации) факторов, если существует элемент $a \in \Xi$, для которого $d(a, \Phi_\xi) \geq 1$

3.2. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Как уже было ранее отмечено, в системе схема элементов инфраструктуры ПСЖ представляет собой ориентированный граф $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$, в котором вершины a_i соответствуют элементам инфраструктуры, а ребра f_{ij} – связям между элементами a_i, a_j . Наличие в графе ориентированного ребра f_{ij} , идущего из вершины a_i в вершину a_j , означает, что повреждение элемента a_i вызывает повреждение элемента a_j , см. рис. 2.4.

Для каждой пары элементов инфраструктуры a_i, a_j , соединенных ребрами, вводятся функции влияния $h_{ij}(d(a_i))$ и $h_{ji}(d(a_j))$, имеющие следующий смысл. Если в графе инфраструктуры имеется ориентированное ребро $a_i \rightarrow a_j$, идущее из элемента a_i в элемент a_j , и элемент a_i имеет степень повреждения $d(a_i)$, тогда элемент a_j должен иметь степень повреждения равную $h_{ij}(d(a_i))$. Аналогичный смысл имеет функция $h_{ji}(d(a_j))$. Очевидно, что $h_{ji}(0) = 0$. Например, в графе инфраструктуры ПСЖ «Водоканал», приведенном на рис. 2.4, элемент $a_8 = \text{«Станция технологической обработки воды»}$ соединен с элементом $a_9 = \text{«Резервуар чистой воды»}$ ребром $a_1 \rightarrow a_2$.

$$(2) \quad h_{89}(d) = \begin{cases} 0, & \text{если } d = 0, \\ 0, & \text{если } d = 1, \\ 2, & \text{если } d = 2. \end{cases}$$

Функция влияния (2) имеет следующий смысл: частичное повреждение «Станции технологической обработки воды» не вызывает повреждений «Резервуара чистой воды», и только полное разрушение здания станции вызывает разрушение резервуара, см. таблицу 3.2.

Степень повреждения для всей совокупности элементов инфраструктуры $\{a_j\}$ определяется как распределение величин $\{d(a_j), j = 1, 2, \dots\}$ и вычисляется следующим образом.

Шаг №1. Определяется $M(F)$ – множество вершин графа $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$, которые соответствуют элементам инфраструктуры, подвергшихся прямому воздействию волны цунами.

Шаг №2. Для каждой вершины a из множества $M(F)$ на основе моделирования наката волны на береговую линию производится оценка значений параметров волны цунами и с их помощью с использованием таблиц вида 3.3. оцениваются $\tilde{d}(a)$, $a \in M(F)$ – степени повреждения элементов инфраструктуры, обусловленные воздействием волны цунами. Оценка производится по формуле (3):

$$(3) \quad \tilde{d}(a) = \sum_{\Phi_\xi} \hat{\varphi}_\xi(a) \cdot d(a, \Phi_\xi),$$

$$(4) \quad \hat{\varphi}_\xi(a) = \varphi_\xi(a) \cdot \left(\sum_{\Phi_\rho} \varphi_\rho(a) \right)^{-1},$$

где (4) – приведенный вес фактора Φ_ξ ; суммирование в обеих формулах производится по всему множеству значимых факторов.

Шаг №3. Определяется подграф $L(M(F))$ графа $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$, являющийся компонентой связности подмножества вершин $M(F)$.

Шаг №4. Для каждой вершины $a \in FL(M(F))$ устанавливается значение степени повреждения $d(a) = 0$.

Шаг №5. Вычисляется множество \mathfrak{R} – возможных распределений степени повреждения $\{d(a)\}$, $a \in L(M(F))$, удовлетворяющих условиям:

- (5) 1. Если ребро $f_{ij} \in L(M(F))$, то $d(a_j) \geq h_{ij}(d(a_i))$;
 2. Если вершина $a \in M(F)$, то $d(a) \geq \tilde{d}(a)$.

Затем из множества \mathfrak{R} в качестве *распределения степеней повреждения элементов инфраструктуры* выбирается распределение $\{d_0(a)\}$, $a \in L(M(F))$, удовлетворяющее условию минимума:

$$(6) \quad \sum_{a \in L(M(F))} d_0(a) = \min \left\{ \sum_{a \in L(M(F))} d(a) \mid \text{минимум по множеству } \mathfrak{R} \right\}.$$

Если распределений, удовлетворяющих условию минимума, несколько, то все они предъявляются экспертам для выбора на основе процедуры согласования.

Пример оценки состояния инфраструктуры ПСЖ «Водоканал», см. рис. 2.4.

Пусть система в качестве множества значимых факторов обнаружила единственный фактор: $\Phi = \langle \text{В зоне } W_1 \text{ наблюдаются следующие значения параметров волн цунами: максимальная глубина затопления от волны цунами} - h_{\max} = 6 \text{ м; максимальная скорость течения воды в волне} - V_{\max} = 3 \text{ м/с; температура воды в волне} - t = 10 \text{ град.; время существования волны (продолжительность затопления)} - T = 0,3 \text{ ч} \rangle$.

Шаг №1. Оказалось, что в зону W_1 попадают два элемента инфраструктуры: $a_8 = \langle \text{Станция технологической обработки воды} \rangle$ и $a_9 = \langle \text{Резервуар чистой воды} \rangle$. Прямому воздействию волн цунами подвергся элемент a_8 , так как резервуар чистой воды находится внутри здания станции технологической обработки воды. Таким образом, $M(F) = a_8$.

Шаг №2. Так как здание станции технологической обработки воды по своему типу относится к промышленным зданиям с лёгким металлическим каркасом, то в соответствии с таблицей 3.3 $\tilde{d}(a_8) = d(a_8, \Phi) = 2$.

Шаг №3. Подграф $L(M(F))$, являющийся компонентой связности подмножества вершин $M(F) = a_8$, содержит вершины a_8, a_9 .

Шаг №4. Для всех элементов, кроме a_8, a_9 , устанавливается значение степени повреждения $d(a) = 0$.

Шаг №5. Множество возможных распределений степени повреждения \mathfrak{R} оказывается состоящим из единственного распределения, см. таблицу 3.4, которое и выбирается экспертами в качестве *распределения степеней повреждения элементов инфраструктуры «Водоканал»*.

Таблица 3.4. Распределение степеней повреждения элементов инфраструктуры «Водоканал»

Элемент инфраструктуры	Оценка степени повреждения
Станция технологической обработки воды	2
Резервуар чистой воды	2
Остальные элементы инфраструктуры	0

3.3. ОЦЕНКА НАРУШЕНИЙ В ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Схема технологического процесса ПСЖ представлена в системе ориентированным ациклическим графом $G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\})$, в котором вершины A_i соответствуют технологическим этапам (технологическим операциям), а ребра P_{ij} – связям между элементами A_i, A_j . Наличие в графе ориентированного ребра P_{ij} , идущего из вершины A_i в вершину A_j означает, что сначала выполняется технологический этап A_i , а затем этап A_j . Вершины B_k соответствуют завершающим операциям внешних систем (по отношению к рассматриваемой ПСЖ). Ребро, идущее из B_k в A_i и называемое входным для рассматриваемой ПСЖ, символизирует, что на вход операции A_i поступает материал, являющийся результатом выполнения операции B_k . В

свою очередь, ребро, идущее из A_i в B_k и называемое выходным для рассматриваемой ПСЖ, символизирует, что на вход операции B_k поступает материал, являющийся результатом выполнения операции A_i , см. рис. 3.1.

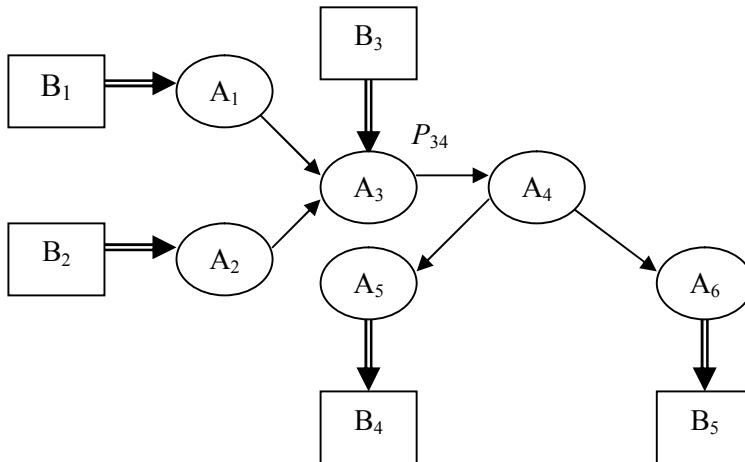


Рис. 3.1. Пример графа

Каждому ориентированному ребру P_{ij} , идущему из вершины A_i в вершину A_j , сопоставлен *вектор значений технологических параметров* $X_{ij} = (x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^{n(ij)})$. По отношению к операции A_i вектор X_{ij} описывает характеристики результата её выполнения. По отношению к операции A_j вектор X_{ij} описывает характеристики поступающего материала в результате выполнения операции A_i . Соответствие (7), где объединение выполняется по всем операциям, результаты выполнения которых попадают на вход операции A_j , моделирует преобразование материала в результате выполнения операции A_j :

$$(7) \bigcup_{\alpha} X_{\alpha j} \rightarrow X_{jk}.$$

Для каждого ориентированного ребра P_{ij} , идущего из вершины A_i в вершину A_j , фиксируются $\mathfrak{Z}_{ij}^0, \mathfrak{Z}_{ij}^1, \mathfrak{Z}_{ij}^2$, – множества значений вектора параметров X_{ij} . При этом множество \mathfrak{Z}_{ij}^0 соот-

ответствует значениям параметров X_{ij} , предусмотренных технологическим регламентом (*нормальный режим функционирования*), множество \mathfrak{T}_{ij}^1 соответствует существенным отклонениям значений параметров X_{ij} от технологического регламента (*аварийный режим функционирования*). Если параметры X_{ij} принимают значения из множества \mathfrak{T}_{ij}^2 , то это означает, что поступающий в результате выполнения операции A_i материал (вода, электрический ток, газ и т.д.) не может подаваться на вход операции A_j (*разрыв связи между технологическими операциями A_i и A_j*). Аналогичные множества $I_{ij}^0, I_{ij}^1, I_{ij}^2$ и $U_{ij}^0, U_{ij}^1, U_{ij}^2$ вводятся, соответственно, для входных и выходных ребер рассматриваемой ПСЖ.

Пример технологических параметров операции.

В схеме технологического процесса для ПСЖ «Водоканал» (см. рис. 2.5.) представлена операция A_4 – «Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды». У этой операции имеется три входные стрелки (связи) – P_{14}, P_{24}, P_{34} , идущие из вершин «Подъем воды от водозаборов №№1, 2, 3», одна стрелка P_{04} ведущая от ПСЖ «Подача электроэнергии», а также одна выходная стрелка P_{45} , ведущая из вершины A_4 в вершину A_5 , соответствующую операции «Технологическая обработка воды». С каждой из перечисленных стрелок связаны векторы значений технологических параметров, см. таблица 3.5.

Следствием воздействия цунами на элементы инфраструктуры ПСЖ может быть снижение качества выполнения технологических операций. Для оценки величины $Q(A_j)$, качества выполнения технологической операции A_j , вводится лингвистическая шкала, см. таблицу 3.6.

Таблица 3.5. Технологические параметры операции: «Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды»

Технологический параметр	Значения технологического параметра		
	Нормальный режим функционирования	Аварийный режим функционирования	Разрыв связи
Объем забираемой воды из водозабора №№1,2,3 V_{14}, V_{24}, V_{34} (м ³ /час)	$\mathfrak{V}_{14}^0 = \{V_{14} \geq 50\}$ $\mathfrak{V}_{24}^0 = \{V_{24} \geq 50\}$ $\mathfrak{V}_{34}^0 = \{V_{34} \leq 80\}$	$\mathfrak{V}_{14}^1 = \{30 \leq V_{14} < 50\}$ $\mathfrak{V}_{24}^1 = \{30 \leq V_{24} < 50\}$ $\mathfrak{V}_{34}^1 = \{50 \leq V_{34} < 80\}$	$\mathfrak{V}_{14}^2 = \{V_{14} \leq 30\}$ $\mathfrak{V}_{24}^2 = \{V_{24} \leq 30\}$ $\mathfrak{V}_{34}^2 = \{V_{34} \leq 50\}$
Подаваемая электрическая мощность W_{04} (квт/час)	$I_{04}^0 = \{W_{04} \leq 800\}$	$I_{04}^1 = \{800 \leq W_{04} < 600\}$	$I_{04}^2 = \{W_{04} < 600\}$
Объем воды, подаваемой на станцию обработки V_{45} (м ³ /час)	$U_{45}^0 = \{V_{45} \geq 100\}$	$U_{45}^1 = \{70 \leq V_{45} < 100\}$	$U_{45}^2 = \{V_{45} < 70\}$

Таблица 3.6. Шкала оценки качества выполнения технологических операций

Лингвистическая шкала	Числовая оценка	Комментарий
«норма»	0	Операция выполняется в соответствии с технологическим регламентом
«отклонение»	1	Операция выполняется, но наблюдаются существенные отклонения от технологического регламента
«остановка»	2	Операция не выполняется

Пусть вершина A_j имеет входные стрелки $P_{\lambda(1)j}, \dots, P_{\lambda(k)j}$ и выходные стрелки $P_{j\mu(1)}, \dots, P_{j\mu(l)}$ (см. рис. 3.2.)

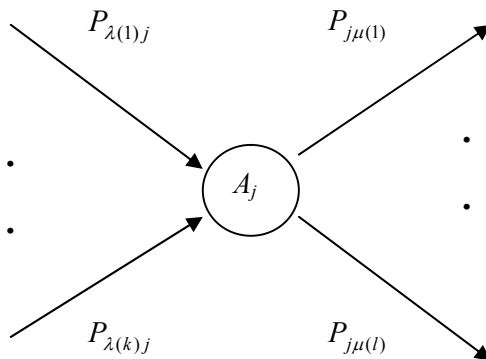


Рис. 3.2. Вершина графа

Для каждого значения качества выполнения операции $Q(A_j) \neq 2$ вводится отображение (8), которое называется *технологической характеристикой операции A_j* и определяет параметры выходного материала в зависимости от параметров входного материала.

$$(8) \quad \Omega_{Q(A_j)} : \left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$\alpha(p) = 0, 1, \quad \beta(q) = 0, 1, \quad p = 1, \dots, k, \quad q = 1, \dots, l.$$

Очевидно,

$$\Omega_2 : \left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^2, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^2 \right), \quad \forall \alpha(p), p = 1, \dots, k.$$

Пример технологической характеристики операции.

Для операции A_4 («Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды») ПСЖ «Водоканал» технологическая характеристика имеет следующий вид:

$$Q(A_4) = 0: \quad \left(\mathfrak{Z}_{14}^0, \mathfrak{Z}_{24}^0, \mathfrak{Z}_{34}^0, I_{04}^0 \right) \mapsto U_{45}^0,$$

$$\left(\mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^1, \text{ если } \alpha(k) \geq 1$$

и $\alpha(k_0) = 1$ для некоторого $k_0 = 1, 2, 3, 4$,

$$\left(\mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

если $\alpha(k_0) = 0$ для некоторого $k_0 = 1, 2, 3, 4$,

$$(9) \quad Q(A_4) = 1: \quad \left(\mathfrak{Z}_{14}^0, \mathfrak{Z}_{24}^0, \mathfrak{Z}_{34}^0, I_{04}^0 \right) \mapsto U_{45}^1,$$

$$\left(\mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

если $\alpha(k_0) = 1$ для некоторого $k_0 = 1, 2, 3, 4$,

$$Q(A_4) = 2: \quad \left(\mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

при любых $\alpha(1), \alpha(2), \alpha(3), \alpha(4)$.

С целью моделирования воздействия волн цунами на качество функционирования рассматриваемой ПСЖ, которое выражается в величинах характеристик материала завершающих операций, для каждого элемента инфраструктуры a_i вводится матрица воздействий $((Q_i)_\delta)$. Элемент $(Q_i)_\delta^j$, стоящий на пересечении столбца с номером j и строки с номером δ , равен качеству выполнения операции A_j при условии, что степень повреждения элемента инфраструктуры равна $\delta - 1$:

$$(10) \begin{matrix} (\delta = 1, d(a_i) = 0) \\ (\delta = 2, d(a_i) = 1) \\ (\delta = 3, d(a_i) = 2) \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots \\ (Q_i)_2^1 & \dots & (Q_i)_2^2 & \dots \\ (Q_i)_3^1 & \dots & (Q_i)_3^2 & \dots \end{bmatrix}.$$

Таким образом, матрица воздействий имеет три строки, а число столбцов совпадает с числом технологических операций рассматриваемой ПСЖ. Элементы таблицы – числа 0, 1, 2.

Пример матрицы воздействий.

Для элемента инфраструктуры ПСЖ «Водоканал» a_4 – «насосная станция первого подъема» матрица воздействий имеет вид:

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
$d(a_4) = 0$	0	0	0	0	0	0	0
$d(a_4) = 1$	1	1	2	0	0	0	0
$d(a_4) = 2$	2	2	2	0	0	0	0

Таким образом, повреждение элемента «Насосная станция первого подъема» влияет на качество выполнения операций «Подъем воды от водозаборов №№1, 2, 3». Причем в силу конструктивных особенностей повреждение насосной станции средней степени вызывает полное прекращение подъема воды из водозабора №3.

Схема технологического процесса, технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования, технологические характеристики операций, матрицы воздействий элементов инфраструктуры вводятся в систему на этапе её настройки при помощи процедур, которые подробно изложены в последующих разделах. Таким образом, оценка нарушений в осуществлении технологических процессов отдельных подсистем жизнеобеспечения сводится к определению качества выполнения для каждой технологической операции.

Если на предшествующем этапе (этап №2, см. рис. 2.5.) определено распределение степени повреждения $\{d(a)\}$, $a \in F$ элементов инфраструктуры, то на основе семейства матриц воздействий система определяет для каждой технологической операции A_j качество выполнения $Q(A_j)$. При этом если на тех-

нологическую операцию оказывает влияние несколько элементов инфраструктуры, то качество выполнения принимается равным

$$(11) \quad Q(A_j) = \max \left\{ (Q_i)_{d(a)}^j \mid a \in F(\{a_i\}, \{f_{ij}\}) \right\}.$$

3.4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСЕЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

На основе распределения качества выполнения технологических операций $\{Q(A)\}$, $A \in G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\})$ система вычисляет семейство отображений (12), которое позволяет по значениям параметров входного материала определить значения параметров выходного материала для каждой подсистемы жизнеобеспечения $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$.

$$(12) \quad \Omega_{Q(A)} : \left(\mathfrak{I}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{I}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{I}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{I}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$A \in G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\}),$$

$$\alpha(p) \in \{0, 1\}, \beta(q) \in \{0, 1\}, \quad p = 1, \dots, k, \quad q = 1, \dots, l.$$

Далее система на основе значений параметров входного материала определяет значения параметров выходного материала для всей системы жизнеобеспечения населения (см. рис. 2.1.) при помощи полученных на предыдущем этапе оценок качества функционирования подсистем $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$.

Результаты оценки значений параметров выходного материала для всей системы жизнеобеспечения предъявляются для анализа экспертам, на основе которого они делают заключение о состоянии системы жизнеобеспечения и принятии необходимых мер по снижению возможных последствий.

4. Процедуры определения исходных данных для прогнозирования

Для функционирования системы необходима экспертная, техническая и технологическая информация, которая для каждой ПСЖ включает в себя:

- 1) схему инфраструктуры подсистемы жизнеобеспечения;
- 2) множество возможных факторов воздействия на блоки элементов инфраструктуры;
- 3) множество значимых факторов воздействия на блоки элементов инфраструктуры;
- 4) функции влияния блоков элементов инфраструктуры;
- 5) схему технологического процесса подсистемы жизнеобеспечения;
- 6) таблицы степеней повреждения элементов инфраструктуры для каждого фактора воздействия;
- 7) таблицы весов факторов воздействия для блоков элементов инфраструктуры;
- 8) технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования;
- 9) технологические характеристики операций;
- 10) матрицы воздействий блоков элементов инфраструктуры на технологические операции.

При формировании необходимой экспертной информации применяются методы согласования экспертных оценок.

Пусть в определении исходных данных для прогнозирования принимают участие эксперты $\mathcal{E}(1), \dots, \mathcal{E}(N)$. Выполнение части процедур работы группы экспертов координирует руководитель группы, который выбирается экспертами на неформальной основе либо при помощи изложенной ниже процедуры.

Система предлагает экспертам осуществить парные сравнения предпочтительности своих коллег как возможных руководителей и проставить оценки в виде индексов δ_{jkd} , характеризующих степень предпочтительности j -го члена группы относительно k -го с субъективной точки зрения d -го члена группы, $j, k = 1, \dots, N$. При этом предполагается, что член группы d не сравнивает себя с другими членами группы, т.е. $j \neq d$, $k \neq d$. Индекс δ_{jkd} выставляется в соответствии с таблицей 4.1. При этом выполняется правило: $\delta_{kjd} = -\delta_{jkd}$.

Отношение $r_{ikd} = \exp(\gamma\delta_{ikd})$ считается численной оценкой отношения предпочтительности j -го эксперта к предпочтитель-

ности k -го эксперта. Значение γ порождает логарифмическую шкалу, является параметром системы и устанавливается при наладке системы.

Таблица 4.1. Шкала сравнений степени предпочтительности экспертов

Лингвистическая шкала	Значение индекса δ_{ikd}
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ значительно превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+8
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ существенно превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+6
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+4
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ слегка превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+2
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ эквивалентен по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	0

Затем строится вектор $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$ предпочтительности каждого члена группы с помощью логарифмической регрессии (13), минимизирующей разницу между отношениями P_j/P_k и δ_{jkd} , где D_{jk} – множество экспертов, высказавших свою оценку остальным. В результате получаются оценки степени предпочтительности (14):

$$(13) \sum_{j < k} \sum_{d \in D_{jk}} (\ln r_{jkd} - \ln P_j + \ln P_k)^2,$$

$$(14) \ln P_i = \frac{1}{N(N-2)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq i, d \neq k}}^N \ln r_{ikd}.$$

Эксперт, получивший наибольшую оценку, предлагается системой в качестве кандидатуры руководителя остальным экспертам для утверждения. Если одинаковые наибольшие

оценки получили несколько экспертов, то в качестве кандидатуры система выбирает из них одного случайным образом.

В процессе формирования исходных данных для прогнозирования экспертам приходится согласовывать различные числовые значения используемых характеристик. Процедура согласования может быть организована следующим образом. Пусть в согласовании значения величины x_j принимают участие эксперты $\mathcal{E}(1), \dots, \mathcal{E}(N)$. Каждому эксперту система предлагает сделать оценку значения величины x_j . Оценки экспертов показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Оценки экспертов

Эксперты	$\mathcal{E}(1)$	$\mathcal{E}(2)$	...	$\mathcal{E}(N)$
Оценка значения	x_{j1}	x_{j2}	...	x_{jN}

Далее система определяет:

$$(15) \bar{x}_j = \frac{\sum_i x_{ij}}{N} \text{ – среднее значение оценки;}$$

$$(16) D_j = \frac{1}{N-1} \sum_i (\bar{x}_j - x_{ij})^2 \text{ – дисперсию оценки;}$$

$$(17) P_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\bar{x}_j} \text{ – профиль } i\text{-го эксперта.}$$

Затем система вычисляет скорректированные средние оценки x_j^* по следующему правилу.

- Если дисперсия невелика, то находится среднее значение и оно предлагается участникам для согласования.
- Если дисперсия большая, то анализируются профили участников.
- Если профиль участника «+» и его значение невелико, т.е. оценка участника выше среднего – ее значение уменьшается на $0,1x_j$.

- Если профиль участника «+» и его значение велико, т.е. оценка участника выше среднего – ее значение уменьшается на $0,3x_j$.
- Если профиль участника «-» и его значение невелико, т.е. оценка участника ниже среднего – ее значение увеличивается на $0,1x_j$.
- Если профиль участника «-» и его значение велико, т.е. оценка участника ниже среднего – ее значение увеличивается на $0,3x_j$.

Величины увеличения и уменьшения оценки эксперта ($0,1x_j$, $0,3x_j$) устанавливаются при настройке системы и могут пересматриваться. Понятие «большой» и «малой дисперсии» определяется в виде порогового значения, которое устанавливается заранее и может пересматриваться. Вычисленная скорректированная средняя оценка предлагается экспертам для согласования. Эксперты могут утвердить предложенное среднее в качестве оценки или продолжить согласование. Число итераций согласования устанавливается заранее и может пересматриваться.

4.1. ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ И СХЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДСИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Процедура формирования схемы инфраструктуры осуществляется экспертами отдельно для каждой подсистемы жизнеобеспечения (ПСЖ). Работу группы экспертов координирует руководитель.

Исходным материалом для формирования схемы инфраструктуры ПСЖ выступает информация о инфраструктуре ПСЖ, которая представлена в виде технической документации на ПСЖ, а также в виде знаний каждого эксперта.

Экспертам необходимо сформировать схему инфраструктуры ПСЖ в виде ориентированного графа, в котором вершины соответствуют блокам элементов инфраструктуры, а ребра – связям между блоками.

1 этап.

Система предлагает каждому эксперту $\mathcal{E}(j)$, $j = 1, \dots, N$, сформировать множество блоков элементов инфраструктуры ПСЖ. Блоки описываются фразами, которые могут содержать количественные показатели, например: $a_1 = \text{«Насосная станция второго подъема воды №1»}$. При этом должны выполняться следующие условия:

- фразы, описывающие вершины, должны однозначно указывать на части инфраструктуры ПСЖ и пониматься экспертами (условие интерпретируемости);
- совокупность элементов инфраструктуры, объединенных в блоках, полностью отражает инфраструктуру ПСЖ (условие полноты).

2 этап.

Система предъявляет каждому эксперту $\mathcal{E}(d)$, $d = 1, \dots, N$, набор множеств блоков элементов инфраструктуры ПСЖ, сформированных остальными экспертами: $\{F_k, k = 1, 2, \dots, N, k \neq j\}$ и предлагает осуществить парные сравнения множеств блоков, предложенных остальными экспертами и проставить оценки в виде индексов δ_{jkd} , характеризующих степень предпочтительности множества блоков j -го члена группы относительно множества блоков k -го с субъективной точки зрения d -го члена группы, $j, k = 1, N$. При этом предполагается, что член группы d не сравнивает своё множество с другими, т.е. $j \neq d, k \neq d$. Индекс δ_{jkd} выставляется в соответствии с таблицей 4.3. При этом выполняется правило: $\delta_{kjd} = -\delta_{jkd}$.

Таблица 4.3. Шкала сравнений степени предпочтительности схем, предложенных экспертами

Лингвистическая шкала	Значение индекса δ_{jkd}
Множество F_j значительно предпочтительней множества F_k	+8
Множество F_j существенно предпочтительней множества F_k	+6
Множество F_j предпочтительней множества F_k	+4
Множество F_j немного предпочтительней множества F_k	+2
Множество F_j эквивалентно множества F_k	0

Затем строится вектор $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, $P_i > 0$ оценок предпочтительности предложенных экспертами множеств блоков с помощью регрессии (18), минимизирующей разницу между отношениями P_j/P_k и δ_{jkd} :

$$(18) \sum_{j < k} \sum_d (P_j / P_k - \delta_{jkd})^2 .$$

3 этап.

Множество, получившее наибольшую оценку предпочтительности, предлагается руководителю для утверждения в качестве согласованного множества блоков элементов инфраструктуры ПСЖ. Если одинаковые наибольшие оценки получили несколько множеств, то в качестве варианта для утверждения компьютерная система выбирает для утверждения руководителем одно из них случайным образом.

Получив вариант множества для утверждения, руководитель может внести свои изменения. Утвержденное руководителем множество принимается в качестве согласованного множества блоков элементов инфраструктуры – множества вершин схемы инфраструктуры ПСЖ.

4 этап.

На четвертом этапе процедуры эксперты определяют и согласовывают существование отношений влияния между блоками элементов инфраструктуры. Два блока элементов инфраструктуры a_i и a_j связаны отношением влияния, если повреждение блока a_i вызывает повреждение блока a_j . Система предъявляет каждому эксперту пары блоков элементов инфраструктуры и предлагает указать оценку для каждой предъявленной пары (a_i, a_j) по следующему правилу: если отношение влияния имеет место, то эксперт ставит «+», если нет, то «-». Пары предъявляются экспертам в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления.

После получения ответов от всех экспертов в системе формируется сводная таблица ответов, см. таблицу 4.4.

Таблица 4.4. Сводная таблица ответов

Пары (a_i, a_j)	Эксперты			Результат	
	Э(1)	...	Э(N)	«+»	«-»
(a_1, a_2)	+	...	-	N_{12}	$N - N_{12}$
(a_1, a_3)	-	...	+	N_{13}	$N - N_{13}$
...
(a_i, a_j)	+	...	+	N_{ij}	$N - N_{ij}$
...

Здесь N_{ij} равны числу плюсов в строке, соответствующей паре (a_i, a_j) (числу экспертов, которые указали существование отношения влияния для пары (a_i, a_j)).

Далее система производит обработку сводной таблицы по следующему правилу: считается, что блок a_i оказывает влияние на блок a_j , если число $N_{ij} > \beta N$. Значение величины $0 < \beta < 1$ устанавливается при наладке системы и может пересматриваться. Результат обработки предъявляется экспертам в виде схемы инфраструктуры ПСЖ.

Схема технологического процесса ПСЖ формируется при помощи аналогичной процедуры.

4.2. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ВОЗМОЖНЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БЛОКИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Произвольный фактор воздействия представлен в системе в виде набора $(W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$, используемые обозначения совпадают с обозначениями раздела 3.1.

Формирование множества $\{W_1, \dots, W_h\}$ осуществляется экспертами при помощи процедуры, которая организована следующим образом.

На *первом шаге* руководитель формирует множество зон $\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$, удовлетворяющее условию: в каждую зону попадает один блок элементов инфраструктуры, представленный в схеме инфраструктуры. В качестве подсказки в систему может быть введено множество зон, которые являются частями территории расположения ПСЖ.

На *втором шаге* система предъявляет экспертам построенное руководителем множество и предлагает каждому эксперту ответить на вопрос: «Какие пары зон могут быть, по его мнению, объединены в одну?». Система предъявляет эксперту пары зон в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Эксперт заносит свои ответы в таблицу по следующему правилу: если пара (W_α^0, W_β^0) может быть объединена в одну зону, то эксперт ставит знак «+», если нет, то знак «-». В результате ответов каждого эксперта система сформирует сводную таблицу 4.5

На *третьем шаге* система производит обработку сводной таблицы по следующему правилу: считается, что зоны W_α^0, W_β^0 могут быть объединены в одну зону, если число $N_{\alpha\beta} > \rho N$ (значение величины $0 < \rho < 1$ устанавливается при наладке системы и может пересматриваться). В этом случае в столбце «согласованная оценка» ставится знак «+». В противном случае – знак «-».

Таблица 4.5. Сводная таблица ответов экспертов

Согласованная оценка	Пары зон	Эксперты			Результат Количество «+»
		Э(1)	...	Э(N)	
+	(W_1^0, W_2^0)	-	...	+	N_{12}
...
-	(W_α^0, W_β^0)	+	...	+	$N_{\alpha\beta}$
...

На четвертом шаге система строит граф $G\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$, по правилу:

- множество вершин графа составляет множество $\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$;
- вершины W_α^0, W_β^0 соединены ребром только, если «согласованная оценка» = «+».

Далее граф $G\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$, разбивается на компоненты связности $C_1(G) \cup C_2(G) \cup \dots \cup C_q(G)$. Каждая компонента связности $C_p(G)$ порождает новый элемент: $W_p^0 = \cup W_i^0$, объединение осуществляется по всем вершинам $W_i^0 \in C_p(G)$. Полученное в результате множество $\{W_1, \dots, W_p\}$ выбирается в качестве согласованного множества зон расположения ПСЖ.

Для каждого из параметров $(h_{\max}, V_{\max}, t, T)$ формируется дискретная шкала значений (19), которая устанавливается экспертами при помощи изложенной в начале раздела процедуры согласования на основе понятия профиля. В качестве подсказки значений дискретных шкал система предлагает экспертам таблицы вида 3.3, которые вводятся в систему на этапе настройки.

$$(19) (h_{\max} = h^1, h^2, \dots; V_{\max} = V^1, V^2, \dots; t = t^1, t^2, \dots; T = T^1, T^2, \dots,)$$

В результате выполнения перечисленных операций в системе сформировано множество возможных факторов воздействия $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$, в котором каждый фактор воздействия представляет собой набор $(W_i, h^p, V^q, t^s, T^t)$.

4.3. ФОРМИРОВАНИЕ ТАБЛИЦ СТЕПЕНЕЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ БЛОКОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ВЕСОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ ФАКТОРОВ

Таблицы степеней повреждения блоков элементов инфраструктуры и веса воздействий формируются совместно для каждого фактора воздействия.

Система предлагает каждому эксперту $\mathcal{E}(j)$, $j = 1, \dots, N$, заполнить таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Таблица степеней повреждения и весов воздействия для блоков элементов инфраструктуры

	Фактор Φ_1		...	Фактор Φ_ξ	
	Степень повреждения	Вес воздействия		Степень повреждения	Вес воздействия
Блок элементов инфраструктуры a_1	$d_j(a_1, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_1, \Phi_1)$	...	$d_j(a_1, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_1, \Phi_\xi)$
Блок элементов инфраструктуры a_2	$d_j(a_2, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_2, \Phi_1)$	...	$d_j(a_2, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_2, \Phi_\xi)$
...	
Блок элементов инфраструктуры a_k	$d_j(a_k, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_k, \Phi_1)$	...	$d_j(a_k, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_k, \Phi_\xi)$

В этой таблице величины $d_j(a_k, \Phi_\xi)$ и $\varphi_j(a_k, \Phi_\xi)$ равны, по мнению эксперта $\mathcal{E}(j)$, соответственно степени повреждения блока элементов инфраструктуры a_k для фактора воздействия Φ_ξ и весу воздействия фактора Φ_ξ на блок элементов инфраструктуры a_k . Для формирования подсказки экспертам в системе предусмотрена автоматическая оценка степеней повреждения на основе таблиц вида 3.3. Экспертам предъявляется подсказка в виде таблицы вида 4.6, в которой приведены результаты автоматической оценки степеней повреждения блоков элементов

инфраструктуры. Система предлагает экспертам внести коррективы в результаты автоматической оценки, если они считают это необходимым.

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованных оценок степени повреждения блока элементов инфраструктуры a_k для фактора воздействия Φ_ξ и веса воздействия фактора Φ_ξ на блок элементов инфраструктуры a_k принимаются, соответственно, величины

$$(20) \quad d(a_k, \Phi_\xi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi) < d_0, \\ 1, & \text{если } d_0 < \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi) < d_1, \\ 2, & \text{если } d_1 < \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi); \end{cases}$$

$$\phi(a_k, \Phi_\xi) = \frac{1}{N} \sum_j \phi_j(a_k, \Phi_\xi);$$

где значения пороговых величин d_0, d_1 удовлетворяют условию $0 < d_0 < d_1 < 2$ и выбираются при наладке системы.

4.4. ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Формирование набора величин $h_{ij}(d(a_i))$ – функций влияния, определяющих величину влияния повреждения блока элементов инфраструктуры ПСЖ на другие блоки, осуществляется следующим образом.

Система предъявляет каждому эксперту пары блоков элементов инфраструктуры, для которых ранее (см. раздел 4.1) установлено отношения влияния, и предлагает указать для каждой предъявленной пары (a_i, a_j) оценку функции влияния $h_{ij}(d(a_i))$. Пары предъявляются экспертам в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Для каждой предъявленной пары (a_i, a_j) эксперт $\Xi(l)$ указывает величины $h_{ij}^l(1), h_{ij}^l(2)$ (смысл величин определен в разделе

3.2). После получения ответов от всех экспертов в системе формируется таблица экспертных оценок функций влияния, см. таблицу 4.7.

Таблица 4.7. Таблица экспертных оценок функций влияния

Пары (a_i, a_j)	Эксперты				
	$\Xi(1)$	...	$\Xi(j)$	...	$\Xi(N)$
(a_1, a_2)	$h_{12}^1(1)$	...	$h_{12}^j(1)$	...	$h_{12}^N(1)$
	$h_{12}^1(2)$	...	$h_{12}^j(2)$	...	$h_{12}^N(2)$
...
(a_i, a_j)	$h_{ij}^1(1)$	...	$h_{ij}^j(1)$	...	$h_{ij}^N(1)$
	$h_{ij}^1(2)$	...	$h_{ij}^j(2)$	...	$h_{ij}^N(2)$
...

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованных оценок функции влияния для пары (a_i, a_j) принимаются величины (21).

$$(21) \quad h_{ij}(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_l h_{ij}^l(d) < h \\ 2, & \text{если } h < \frac{1}{N} \sum_l h_{ij}^l(d) \end{cases}, \quad d = 1, 2,$$

Значения пороговой величины h удовлетворяет условию $0 < h < 2$ и устанавливается при наладке системы.

4.5. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Сформированное на предшествующих этапах множество возможных факторов воздействия $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$ избыточно, так как содержит факторы воздействия, которые в реальных ситуациях либо никогда не реализуются, либо их воздействие незначительно. По этой причине во множестве возможных факторов выделяется подмножество значимых факторов воздействия. Процедура выделения приведена в настоящем разделе.

Определение набора значимых факторов осуществляется на основе моделирования наката волны на береговую зону. В моделировании цунами можно выделить три этапа вычислений в соответствии с основными этапами этого явления. Первый этап вычислений связан с анализом формирования начальных возмущений свободной поверхности океана и распространения их вблизи очага землетрясения, второй – с изучением распространения волн цунами в открытом океане, и, наконец, на третьем этапе моделируется выход волн на мелководье и их взаимодействие с берегом.

Широко используемый подход к изучению процесса возбуждения цунами заключается в использовании в качестве модели среды слоя сжимаемой жидкости, лежащего на упругом полупространстве, а в качестве уравнения движения – уравнения Ляме с учетом гравитационных составляющих. Колебания жидкости и подстилающего полупространства вычисляются при этом как решение прямой динамической задачи о возбуждении волн модельным пространственным источником с движущимся разрывом, помещенным внутри упругого полупространства. Поскольку в уравнениях движения и в граничных условиях учитывается сила тяжести, в решении присутствуют не только сейсмические, но и гравитационные волны, в том числе волны цунами. Это позволяет провести совместный анализ условий их возбуждения для того, чтобы выяснить наличие физических связей или корреляции между ними, которую можно было бы использовать для прогноза цунами.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Слой однородной сжимаемой жидкости (воды) располагается на однородном упругом полупространстве (породы земной коры) и находится в однородном поле силы тяжести. Пусть H – толщина слоя жидкости (глубина океана). На глубине h под дном находится модельный источник – очаг землетрясения. Уравнение Ляме имеют вид (22):

$$(22) \quad V_0 \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} - g \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{k}} = \partial^2 \bar{\mathbf{u}} / \partial t^2, \quad 0 < z \leq H,$$

$$\bar{\mathbf{F}}(r, \theta, z, t) + (V_p^2 - V_S^2) \text{grad div } \bar{\mathbf{u}} + V_S^2 \Delta \bar{\mathbf{u}} - g \text{div } \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{k}} = \partial^2 \bar{\mathbf{u}} / \partial t^2, z > H,$$

граничные условия на свободной поверхности и дне океана:

$$(23) \begin{cases} [V_0 \text{div } \bar{\mathbf{u}} - g u_z]_{z=+0} = 0, \\ [u_z]_{z=H+0} = [u_z]_{z=H-0}, \\ \left[\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right]_{z=H+0} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right]_{z=H+0} = 0, \\ \left[(V_p^2 - 2V_S^2) \text{div } \bar{\mathbf{u}} + 2V_S^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - g u_z \right]_{z=H+0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} [V_0^2 \text{div } \bar{\mathbf{u}} - g u_z]_{z=H-0}. \end{cases}$$

где $\bar{\mathbf{u}}(r, \theta, z, t) = \{u_r, u_z, u_\theta\}$ – вектор смещения частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле; g – ускорение силы тяжести; $\bar{\mathbf{k}}$ – орт по оси z ; ρ_0 – плотность воды; V_0 – скорость звука в воде; $\bar{\mathbf{F}}$ – функция источника; ρ_1, V_p, V_S – плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве соответственно; ось Oz направлена вертикально вниз.

Начальные условия принимаются нулевыми. В момент времени $t = 0$ включается источник, в качестве которого принимаются вертикальная и горизонтальная единичные сосредоточенные силы, приложенные внутри упругого полупространства в точке с координатами $(0, 0, H + h)$.

Результаты расчетов генерации волн цунами в рамках сформулированной математической модели, в дальнейшем используются в качестве начальных данных для численного моделирования распространения этих волн на реальных участках акватории океана.

При моделировании распространения волн цунами рассматривается идеальная несжимаемая жидкость, находящаяся в однородном поле сил тяжести. Течение предполагается потенциальным, т. е. для вектора скорости $\bar{\mathbf{u}} = \{u, v, w\}$ существует функция $\varphi(x, z, y, t)$ такая, что $\bar{\mathbf{u}} = \text{grad } \varphi$. Здесь u, v, w – компоненты вектора скорости по направлениям x, y, z соответственно. Ось Oz направлена вертикально вверх в сторону, противополо-

ложную направлению ускорения свободного падения, а невозможная свободная поверхность совпадает с горизонтальной плоскостью XOY . Считается, что жидкость заполняет собой некоторую область Q_T , ограниченную сверху свободной поверхностью $z = \eta(x, y, t)$, а снизу – дном (24):

$$(24) \quad z = -\tilde{H}(x, y, t) = -H(x, y) + B(x, y, t).$$

Традиционный подход к моделированию волн на воде, обусловленных гравитационными эффектами, состоит в формулировке задачи в терминах потенциала течения несжимаемой идеальной однородной жидкости, удовлетворяющего уравнению Лапласа (25) и граничным условиям на свободной поверхности и на дне:

$$(25) \quad \Delta\varphi = \varphi_{xx} + \varphi_{yy} + \varphi_{zz} = 0 \text{ при } (x, y, z, t) \in Q_T$$

Кинематическое краевое условие, имеющее вид (26), следует из предположения, что частица жидкости, находившаяся в начальный момент времени на свободной поверхности, остается на ней в течение всего процесса.

$$(26) \quad \varphi_x \eta_x + \varphi_y \eta_y - \varphi_z + \eta_t = 0, \text{ при } z = \eta(x, y, t).$$

Аналогичное кинематическое условие формулируется и на дне:

$$(27) \quad \varphi_x \tilde{H}_x + \varphi_y \tilde{H}_y + \varphi_z + \tilde{H}_t = 0, \text{ при } z = -\tilde{H}(x, y, t).$$

Динамическое краевое условие на свободной поверхности формулируется, исходя из того, что давление p сохраняет на ней постоянное значение, равное атмосферному:

$$(28) \quad p = p_a = 0, \text{ при } z = \eta(x, y, t).$$

Так как рассматриваемое движение потенциально, давление внутри жидкости может быть определено из интеграла Бернулли (29), где g — ускорение силы тяжести, ρ — плотность жидкости, а $f(t)$ — произвольная функция времени, которая может быть присоединена к функции $\varphi(x, y, z, t)$.

$$(29) \quad p/\rho = \varphi_t - gz - \frac{1}{2} |\nabla\varphi|^2 + f(t),$$

Из интеграла Бернулли для точек свободной поверхности жидкости, следует (30), где все производные от потенциала ϕ вычисляются на свободной поверхности $z = \eta(x, y, t)$.

$$(30) \phi_t - \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2) - g\eta = \text{const}.$$

В начальный момент времени задаются также форма свободной поверхности (31) и начальное распределение потенциала скоростей (32), причем функция $\phi_0(x, y, z)$ должна удовлетворять уравнению Лапласа.

$$(31) \eta(x, y, 0) = \eta_0(x, y),$$

$$(32) \phi(x, y, z, 0) = \phi_0(x, y, z).$$

Формулировка задачи в терминах компонент скоростей приводит к системе уравнений Эйлера (33), уравнению неразрывности (34) и условиям отсутствия вихря (35), выполняющимся во внутренних точках области Q_T :

$$u_t + uu_x + vv_y + ww_z = -(1/\rho)p_x,$$

$$(33) v_t + uv_x + vw_y + ww_z = -(1/\rho)p_y,$$

$$w_t + uw_x + vw_y + ww_z = -(1/\rho)p_z - g,$$

$$(34) u_x + v_y + w_z = 0$$

$$(35) u_y = v_x, v_z = w_y, u_z = w_x.$$

Граничные условия переписываются в форме (36), а краевое условие принимает вид (37):

$$(36) \eta_t + u\eta_x + v\eta_y - w = 0, p = 0, \quad \text{при } z = \eta(x, y, t),$$

$$(37) u\tilde{H}_x + v\tilde{H}_y + w = -\tilde{H}_t, \quad \text{при } z = -\tilde{H}(x, y, t).$$

В начальный момент времени задаются распределение скоростей $\vec{u}(x, y, z, 0) = \vec{u}_0(x, y, z)$ и положение свободной поверхности $\eta(x, y, 0) = \eta_0(x, y)$.

Приведенные модели применяются в блоке моделирования наката волны на берег, представляющем собой программный комплекс, построенный на основе следующих модулей:

- математическая модель – система уравнений со своим набором «гидродинамических» параметров: начальных данных, граничных условий, батиметрии, формы границ, рельефа суши, шероховатости, ветрового трения, коэффициентов турбулентного перемешивания и др., а также «математических» параметров – величин, вносимых при выводе уравнений;

- вычислительный алгоритм, аппроксимирующего уравнения математической модели со своими параметрами пространственной и временной дискретизации, схемной и искусственной вязкости и дисперсии, с «дополнительными» граничными условиями, и др.;

- препроцессор, перерабатывающий сценарии подхода волны цунами к береговой зоне в соответствующие «гидродинамические» параметры с целью их адаптации к особенностям вычислительного алгоритма (постановка начальных и краевых условий, пересчет на альтернативные сетки, модификация границ, интерполяция и т.п.);

- блок управления расчетом, отслеживающий нештатные ситуации, возникающие в процессе вычислений (особенно при длительном моделировании) – потеря устойчивости и т.п., и вносящего (автоматически или через пользовательский интерфейс) необходимые изменения параметров вычислительного алгоритма (вплоть до замены модели и алгоритма), обеспечивающего заданное пользователем накопление результатов для последующей обработки и интерпретации и оперативное представление критически важной оперативной информации о динамике моделируемого явления или о ходе вычислений и др.;

- блок отображения, который обрабатывает результаты моделирования, вычисляет необходимые функционалы решения, обеспечивает качественную визуализацию и, при необходимости, выдает в указанные телекоммуникационные каналы автоматически генерируемые сообщения различного объема и характера. Эти же алгоритмы осуществляют отбор и сортировку информации для последующего анализа, ее архивирование и передачу на долговременное хранение.

Процедура оценки набора значимых факторов воздействия на инфраструктуры отдельных подсистем жизнеобеспечения выполняется на этапе наладки системы, ее схема приведена на рис. 4.1.

На первом этапе на основе знаний сейсмотектонических особенностей цунамигенных зон тихоокеанского региона (в виде набора функций источника \vec{F}).

На втором этапе моделируется набор начальных данных для численного моделирования распространения волн на реальных участках акватории океана.

На третьем этапе вычисляются сценарии подхода волн цунами к береговой зоне.

На четвертом этапе моделируются возможные сценарии накат волн на береговую зону. В результате выполнения этого этапа для каждого сценария наката волн цунами для каждой зоны W_i вычисляются максимальная глубина затопления от волны цунами – h_{\max} , м; максимальная скорость течения воды в волне – V_{\max} , м/с; температура воды в волне – t , град.; время существования волны (продолжительность затопления) – T , ч.

На пятом этапе на основе оценок, полученных на предыдущем этапе, оцениваются значения степеней повреждения $d(a, \Phi_\xi)$ (для каждого фактора воздействия Φ_ξ и блока элементов инфраструктуры a). Далее система определяет Ξ – множество блоков элементов инфраструктуры ПСЖ, которые могут подвергнуться прямому воздействию волн цунами. Фактор Φ_ξ включается во множество значимых (в складывающейся ситуации) факторов, если существует блок $a \in \Xi$, для которого $d(a, \Phi_\xi) \geq 1$.

При использовании системы в оперативном режиме набор значимых факторов воздействия на инфраструктуры подсистем жизнеобеспечения можно уточнить на основе информации, поступающей от системы раннего обнаружения цунами (данные глубоководных датчиков, спутниковая информация).

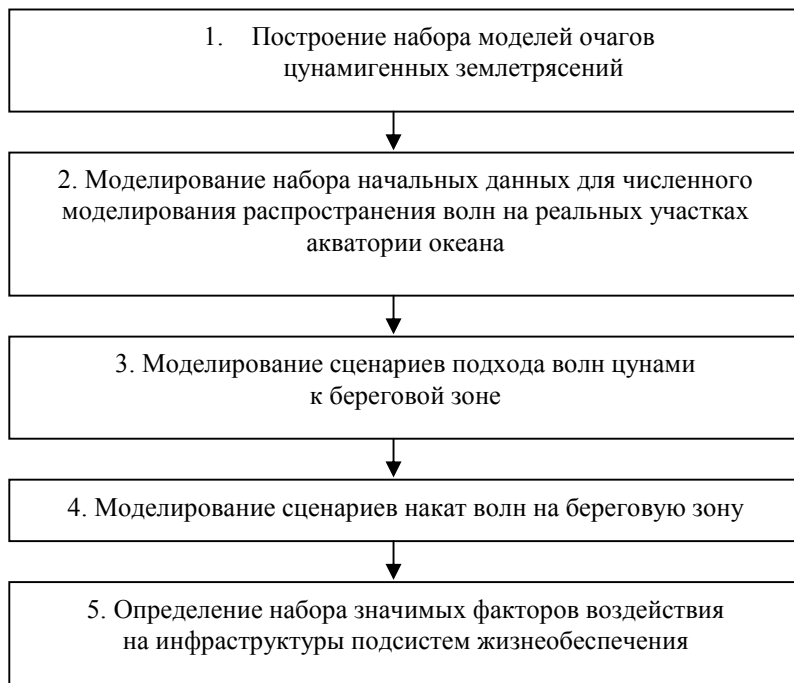


Рис. 4.1. Процедура оценки набора значимых факторов

4.6. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Выбор технологических параметров операций, представленных в схеме технологического процесса, осуществляется экспертами последовательно в порядке следования операций.

На *первом этапе* процедуры эксперты решают задачу выбора параметров для технологических операций. В соответствии с формальным представлением технологического процесса вектор значений технологических параметров должен быть сопоставлен каждому ориентированному ребру P_{ij} , идущему от операции A_i к операции A_j (см. раздел 3.3).

Сначала система предлагает экспертам указать как можно больше параметров, связанных с рассматриваемым ребром P_{ij} . Все ответы экспертов система объединяет общий список.

Далее осуществляется ограничение числа параметров в соответствии с оценками их важности. Система предлагает экспертам оценить каждый параметр по двум критериям: «абсолютная важность» и «относительная важность». Абсолютная важность оценивается по 5-балльной шкале, см. таблицу 4.8.

Таблица 4.8. Шкала абсолютной важности

Лингвистическая шкала	Числовая оценка
Исключительно важный параметр	5
Использование параметра необходимо	4
Использование параметра желательно	3
Использование параметра возможно	2
Параметр значения не имеет	1

Относительная важность оценивается по 100-балльной шкале. Параметры сравниваются экспертом между собой. Выбирается самый важный, по его мнению, параметр и ему присваивается балл 100. Остальные параметры сравниваются с самым важным параметром и для них выставляются баллы, имеющие смысл относительной оценки.

Далее система обрабатывает оценки экспертов и вычисляет для каждого параметра среднее значение (по всем экспертам) абсолютной и относительной важности. Затем из списка удаляются все параметры, которые имеют среднее значение абсолютной важности менее $ABS_{кр}$ или среднее значение относительной важности менее $REL_{кр}$. Значения величин $1 \leq ABS_{кр} \leq 5$, $0 \leq REL_{кр} \leq 100$ устанавливаются при наладке системы. В результате выполнения первого шага в системе сформирован согласованный вектор параметров X_{ij} .

На *втором этапе* процедуры эксперты решают задачу выбора $\mathfrak{F}_{ij}^0, \mathfrak{F}_{ij}^1, \mathfrak{F}_{ij}^2$ – множеств значений вектора параметров $X_{ij} = (x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^{m(i,j)})$ (\mathfrak{F}_{ij}^0 – нормальный режим функционирования

ния, \mathfrak{I}_{ij}^1 – аварийный режим функционирования, \mathfrak{I}_{ij}^2 – разрыв связи между технологическими операциями A_i и A_j , см. раздел 3.3).

На *первом шаге* система предлагает экспертам для каждой компоненты x_{ij}^β вектора X_{ij} указать критические значения (38) такие, что:

- множество (38) соответствует разрыву связи между технологическими операциями A_i и A_j ;
- множество (40) соответствует аварийному режиму функционирования;
- множество (41) соответствует нормальному режиму функционирования.

$$(38) I_1^-(x_{ij}^\beta) < I_0^-(x_{ij}^\beta) < I_0^+(x_{ij}^\beta) < I_1^+(x_{ij}^\beta),$$

$$(39) \left\{ x \mid x < I_1^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid x > I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(40) \left\{ x \mid I_1^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid I_0^+(x_{ij}^\beta) < x < I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(41) \left\{ x \mid I_0^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^+(x_{ij}^\beta) \right\}.$$

На *втором шаге* система обрабатывает ответы экспертов: в качестве (38) – согласованных критических значений компоненты x_{ij}^β – принимаются результаты усреднения по всем ответам, т.е. если эксперт $\mathfrak{E}(p)$, $p = 1, \dots, N$, указал значения (42), то

$$(42) I_{1,p}^-(x_{ij}^\beta) < I_{0,p}^-(x_{ij}^\beta) < I_{0,p}^+(x_{ij}^\beta) < I_{1,p}^+(x_{ij}^\beta),$$

$$(43) I_v^\sigma(x_{ij}^\beta) = \frac{1}{N} \sum_p I_{v,p}^\sigma(x_{ij}^\beta), \quad \sigma \in \{+, -\}, \quad v \in \{0, 1\}.$$

В результате для компоненты x_{ij}^β вектора X_{ij} в системе будут сформированы согласованные критические значения, определяющие режимы функционирования.

На *третьем шаге* система строит искомые множества \mathfrak{I}_{ij}^0 , \mathfrak{I}_{ij}^1 , \mathfrak{I}_{ij}^2 по следующему правилу:

$$\mathfrak{I}_{ij}^0 = \prod_{\beta=1}^{m(i,j)} \left\{ x \mid I_0^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(44) \mathfrak{Z}_{ij}^2 = \left\{ X_{ij} \mid \exists \beta : x_{ij}^\beta \in \left\{ x \mid x < I_1^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid x > I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\} \right\},$$

$$\mathfrak{Z}_{ij}^1 = \left\{ X_{ij} \mid X_{ij} \notin \mathfrak{Z}_{ij}^0 \cup \mathfrak{Z}_{ij}^2 \right\}.$$

4.7. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИЙ

Выбор технологических характеристик операций (см определение в разделе 3.3) осуществляется экспертами последовательно в порядке следования операций в соответствии со схемой технологического процесса.

Пусть рассматривается операция A_j , для которой в графе технологического процесса имеются входные стрелки $P_{\lambda(1)j}, \dots, P_{\lambda(k)j}$ и входные стрелки $P_{j\mu(1)}, \dots, P_{j\mu(l)}$, см. рис. 3.2. Система предлагает каждому эксперту для значения качества выполнения операции $Q(A_j) = 1$ заполнить таблицу соответствий:

$$(45) \left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$\alpha(p) \in \{0, 1\}, \beta(q) \in \{0, 1\},$$

$$p = 1, \dots, k, q = 1, \dots, l.$$

Заполнение осуществляется экспертом по мере предъявления ему комбинаций $\left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$. Последовательность предъявления является случайной, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Если для комбинации $\left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$ эксперты $\mathfrak{E}(p)$, $p = 1, \dots, N$, выбрали комбинации $\left(\mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1,p)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l,p)} \right)$, то система выбирает в качестве согласованного соответствия

$$\left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right), \text{ где } \beta(s) = \max_{p \in \{1, \dots, N\}} \beta(s, p).$$

Если у комбинации $\left(\mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$ хотя бы одно значение $\alpha(s) = 2$, то система автоматически устанавливает соответствие:

$$\left(\mathfrak{F}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{F}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left(\mathfrak{F}_{j\mu(1)}^2, \dots, \mathfrak{F}_{j\mu(l)}^2 \right).$$

Кроме того, очевидно, что

$$\left(\mathfrak{F}_{\lambda(1)j}^0, \dots, \mathfrak{F}_{\lambda(k)j}^0 \right) \mapsto \left(\mathfrak{F}_{j\mu(1)}^0, \dots, \mathfrak{F}_{j\mu(l)}^0 \right).$$

4.9. ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦ ВОЗДЕЙСТВИЙ БЛОКОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

Матрицы воздействий блоков элементов инфраструктуры на технологические операции формируются последовательно для всех блоков, представленных в схеме инфраструктуры ПСЖ. Пусть система выбирала блок элементов инфраструктуры a_i , $i = 1, 2, \dots$.

Система предлагает каждому эксперту $\mathfrak{E}(j)$, $j = 1, \dots, N$, заполнить таблицу 4.9, в которой величина $Q_{\omega}^k(a_i, j)$ равна, по мнению эксперта $\mathfrak{E}(j)$, качеству выполнения технологической операции A_k при условии, что блок элементов инфраструктуры a_i имеет повреждение $d(a_i) = \omega$. В результате в системе сформировано N матриц воздействий с экспертными оценками качества выполнения технологических операций.

Таблица 4.9. Матрица воздействий блока элементов инфраструктуры a_i на технологические операции

	Шкала степеней повреждения блока a_i		
	Повреждение отсутствует $d(a_i) = 0$	Среднее повреждение $d(a_i) = 1$	Полное разрушение $d(a_i) = 2$
Операция A_1	0	$Q_1^1(a_i, j)$	$Q_2^1(a_i, j)$
Операция A_2	0	$Q_1^2(a_i, j)$	$Q_2^2(a_i, j)$
...	0	...	...
Операция A_k	0	$Q_1^k(a_i, j)$	$Q_2^k(a_i, j)$
...	0	...	...

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованной оценки качества выполнения технологической операции A_k при условии, что блок

элементов инфраструктуры a_i имеет повреждение $d(a_i) = \omega$, принимается величина (46), значения пороговых величин q_0, q_1 удовлетворяют условию $0 < q_0 < q_1 < 2$ и выбираются при наладке системы

$$(46) \quad Q_{\omega}^k(a_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j) < q_0, \\ 1, & \text{если } q_0 < \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j) < q_1, \\ 2, & \text{если } q_1 < \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j). \end{cases}$$

5. Заключение

Представленная в работе система может использоваться для решения следующих задач:

1. Прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами.

2. Моделирования возможных состояний системы жизнеобеспечения, которые могут возникнуть в результате реализации гипотетических сценариев воздействия волн цунами.

Использование системы для осуществления экспертного прогнозирования последствий повреждения систем жизнеобеспечения при воздействии волн цунами позволяет осуществить учет различных точек зрения при формировании вариантов прогноза и обеспечивает его выработку практически в реальном масштабе времени.

При выработке решений по разработке мер, направленных на обеспечение безопасности населения и хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшение возможного ущерба от цунами, результаты экспертного прогнозирования поведения систем жизнеобеспечения позволяют обнаружить неприемлемые и ошибочные решения, а также вводить в соот-

ветствии со складывающейся обстановкой необходимые коррективы в составленные ранее планы.

Литература

1. ГАСАНОВ А. З., РЫЖОВ И. В., ЧЕБОТАРЕВ С. С. *Экономические последствия чрезвычайных ситуаций и методические подходы к оценке социально-экономического ущерба*. Учебное пособие, Академия гражданской защиты, Новгородск – 1999.
2. ГУСЯКОВ В. К. *О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения* // В кн.: Математические проблемы геофизики. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР. – 1974. – Вып. 5. – С. 118-140.
3. *Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификация и учет чрезвычайных ситуаций*. – М.: МЧС России, 2001.
4. *Отчёт по проекту 4.2. ГНТП «Безопасность» «Разработка научно-методических основ организации и технологии ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ при катастрофических затоплениях»*. – М.: ВНИИ ГО ЧС, 1995. – 255с.
5. ПОДЪЯПОЛЬСКИЙ Г. С. *Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре* // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1968. – №1. – С. 7-24.
6. ПОДЪЯПОЛЬСКИЙ Г. С. *О связи волны цунами с порождающим ее погребным источником* // В кн.: *Проблема цунами*. – Москва: Наука. – 1968. – С. 51-62.
7. ТРАХТЕНГЕРЦ Э. А. *Компьютерная поддержка принятия решений*. – М: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.

8. ШОКИН Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б., МАРЧУК А. Г., СИМОНОВ К. В. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами* // Новосибирск: Наука, СО, 1989. – 168 с.
9. ЮДИЦКИЙ С. А. *Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. Серия «Управление организационными системами»*. – М.:СИНТЕГ, 2001. – 112 с.
10. SCHOLTE J. G. *Over het Verband tussen Zeegolven Microseismen* // Ned. Acad. Wetenshap. – gewone Vergader, Afdeel, Natuurk: 1943. – Vol. 52. – P. 669-676.

EXPERT FORECAST OF LIFE SUPPORT SYSTEM DAMAGE CONSEQUENCES DUE TO EMERGENCY SITUATIONS

Alexey Andreev, Scientific Production Association "Typhoon", post-graduate student, aka@feerc.obninsk.org.

Kamaev Dmitry Eduardovich, Scientific Production Association "Typhoon", Doctor of Technical Science. kda@feerc.obninsk.org.

Eduard Anatolievich Trahtengerts, Institute of Control Sciences, Doctor of Technical Science, tracht@ipu.rssi.ru.

Abstract: This article expounds functional principles and architecture of the computer system for making a forecast of a life support system state in emergency conditions.

Key words: forecast, life support system, tsunami, computer system, decision support system

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Кульбой