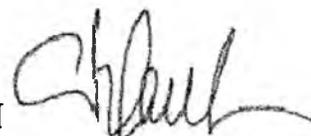


61:07-5/59

**ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

МАТВЕЕВ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ



**МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Специальность: 05.13.10 – Управление в социальных и экономических
системах**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель –
кандидат технических наук
Половинкина А.И.**

Воронеж 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
I. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗМЕНЕНИИ СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В РОССИИ	13
1.1. Состав парка мостов	13
1.2. Состояние мостовых сооружений на федеральной сети	20
1.3. Тенденции развития управления эксплуатацией мостовых сооружений	28
1.4. Направления совершенствования эксплуатации мостов	36
1.5. Система нормативных документов	38
1.6. Выводы и постановка задач исследования	48
II. СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ	50
2.1. Основные принципы эксплуатации мостовых сооружений	50
2.2. Классификация работ по содержанию мостовых сооружений	57
2.3. Возможные стратегии по эксплуатации мостовых сооружений	65
2.4. Планирование работ по содержанию мостов	74
2.5. Планирование работ по содержанию на 2006 и последующие годы	82
2.6. Модель определения вариантов содержания мостовых сооружений	84
III. РАЗРАБОТКА ПЛАНОВ РЕМОНТА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ	96
3.1. Задачи оптимизации планов ремонта	96
3.2. Методы решения задачи минимизации ущерба	98
3.3. Задача минимизации ущерба для случай двух периодов	100
3.4. Решение задачи для случая трех периодов	107
3.5. Приближенный алгоритм решения задачи	117
Заключение.....	120
Литература.....	123
Приложения.....	139

обоснованы математическими доказательствами. Они подтверждены расчетами на примерах, производственными экспериментами и многократной проверкой при внедрении в практику управления.

Практическая значимость и результаты внедрения. На основании выполненных автором исследований созданы модели определения варианта содержания мостовых сооружений и формирования планов ремонтных работ как при текущем, так и при перспективном (то есть на несколько плановых интервалов времени) планировании.

Использование разработанных в диссертации моделей и механизмов позволяет многократно применять разработки, тиражировать их и осуществлять их массовое внедрение с существенным сокращением продолжительности трудозатрат и средств.

Разработанные модели используются в практике разработки планов производства работ по содержанию мостовых сооружений в Федеральном дорожном агентстве Минтранса РФ, ГУ «Управление федеральных автомобильных дорог “Черноземье”», ГУ «Управление автомобильной магистрали “Москва-Архангельск”».

Модели, алгоритмы и механизмы включены в состав учебного курса «Управление проектами», читаемого в Воронежском государственном архитектурно – строительном университете.

На защиту выносятся:

1. Модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.
2. Модель получения множества Парето-оптимальных решений.
3. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.
4. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.
5. Нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.

б. Приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Апробация работы.

Основные результаты исследований и научных разработок докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, совещаниях и научных сессиях: международная конференция «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий» (Москва – Сочи, 2004 г.); международная научно-практическая конференция «Теория активных систем» (Москва, 2005 г.); 5-ая международная конференция «Современные сложные системы управления» (Краснодар, 2004 г.); 5-ая Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2005 г.); международная конференция «Современные сложные системы управления» (Воронеж, 2005 г.); международная научная конференция «Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования» (Воронеж 2005 г.) 60 – 62 научно-технические конференции по проблемам архитектуры и строительных наук (Воронеж, ВГАСУ, 2004-2006 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: в работах [3], [5] автору принадлежит модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов; в работах [1], [4], автору принадлежит модель получения множества Парето-оптимальных решений; в работах [2], [9] автору принадлежит модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба; в работах [8], [10] автору принадлежит модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов; в работах [6], [11] автору принадлежит нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования; в работах [7], [12] автору принадлежит приближенный алгоритм решения задачи

формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 122 страницы основного текста, 22 рисунка, 53 таблицы и приложения. Библиография включает 189 наименования.

Во введении обосновывается актуальность, описываются цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе отмечается, что количество и протяженность мостов на общей сети дорог ежегодно меняется, в связи с чем приводимые статистические данные справедливы для конкретного года статистической отчетности и могут не соответствовать другим опубликованным данным. В тоже время, относительные показатели имеют большую достоверность и более стабильны во времени, поэтому их использование для качественной и количественной оценки парка мостов представляется вполне допустимой и наиболее объективной. Именно поэтому в работе преобладают относительные показатели.

Всего на дорогах общего пользования России эксплуатируется 41,8 тыс. мостов, в том числе капитальных -33,5 тыс. шт., протяженностью около 1500км [1, 2]. В основном это железобетонные мосты (мосты полностью или частично с железобетонными пролетными строениями), число которых составляет 29,5 тыс. шт.

В общем числе железобетонных пролетных строений большая часть представляет собой ребристые конструкции с обычной арматурой - с диафрагмами и без диафрагм. Причем процент бездиафрагменных пролетных строений постоянно возрастает за счет преимущественного их применения в течение последних 20 лет. Даже по сравнению с данными 1995 г. соотношение между диафрагменными и бездиафрагменными существенно изменилось. Это свидетельствует о том, что конструкции 50^х-60^ч годов разработки практически все заменены на современные (бездиафрагменные)

конструкции.

Одновременно с этим возрос процент пролетных строений с напрягаемой арматурой. В последние годы с напрягаемой арматурой применяли и балки длиной 18м, 15м, а иногда и 12м, что традиционно раньше было областью применения каркасных балок.

На автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации остается все еще значительное количество деревянных мостов - 8,3 тыс. шт. или ~ 100 км, что составляет 19,9% от числа и более 6% от общей протяженности искусственных сооружений (см. табл. 1.1.1).

В некоторых областях России процент деревянных мостов существенно выше среднего.

Состояние деревянных мостов на общей сети крайне неудовлетворительное. По результатам обследования деревянных мостов в последние годы в Архангельской, Свердловской, Кировской, Вологодской областях более 15% сооружений находятся в аварийном состоянии, а остальная часть требует ремонта.

До сих пор на сети остается большое количество малых мостов. Со временем число малых мостов уменьшается, хотя и медленно. В основном малые мосты, включая деревянные, расположены на местной сети.

Анализ особенностей состояния мостовых сооружений (далее МС) позволил установить тенденции и определить проблемы, с которыми придется сталкиваться федеральной службе эксплуатации и управленческому аппарату отрасли.

Во второй главе отмечается, что теоретической основой содержания мостовых сооружений является сохранение надежности и повышение долговечности конструкций за счет своевременного выполнения в необходимом (научно-обоснованном) объеме комплекса мероприятий на различных этапах функционирования сооружения. К таким «мероприятиям» относятся 120 видов конкретных работ, объединенных в три группы:

- уход - нормативные, постоянно выполняемые работы (33 вида работ)

с целью сохранения первоначального состояния и исключения появления дефектов и повреждений в раннем возрасте;

- профилактика - сверхнормативные работы (55 видов работ), выполняемые с интервалом 2-5 лет с целью снижения темпов начавшихся деградиционных процессов в материалах и элементах;

- планово-предупредительные работы (ППР) - специальные работы (32 вида работ), выполняемые с целью предупреждения нарушения (раннего истощения) работоспособности элементов и конструкций за счет устранения накопившегося в них износа, размер которого еще не превысил допустимого уровня.

Работы по содержанию мостовых сооружений планируются на основании непрерывного мониторинга мостов. Задачу обеспечения мониторинга состояния мостовых сооружений обеспечивается с помощью диагностики.

Диагностикой мостов, помимо обследований и испытаний, начали заниматься с 1991 года. Причиной введения нового вида надзора в 1991 г. явился непрекращающийся рост «недоработки» мостов и невозможность объективной оценки текущего состояния сооружений, что не позволяет осуществить главное требование работ по содержанию: работы должны выполняться своевременно и в необходимом объеме. Периодичность работ по диагностике 5 лет решает на первом этапе задачи повышения достоверности текущей информации и снижает возможную ошибку при определении объемов планово-предупредительных (содержание) и ремонтных работ.

Основной задачей службы эксплуатации мостов является не только получение и накопление информации о состоянии парка мостовых сооружений страны, но и дифференцированно распределять средства, то есть регулировать финансирование в зависимости от принятой стратегии эксплуатации. При правильном содержании объекта, то есть выполнении работ, относящихся в первую очередь к надзору, уходу, профилактике вообще может не потребоваться ремонта. Это видно из сопоставления затрат при разных стратегиях эксплуатации [55]. Рассмотрены схемы затрат при десяти возмож-

ных стратегиях эксплуатации - от так называемой "нулевой стратегии" ("Do Nothing" - ничего не делаем, то есть не вкладываем средств в сооружение после его строительства) до стратегии с полным использованием всей номенклатуры работ.

Анализ затрат по различным стратегиям эксплуатации мостового сооружения с железобетонными пролетными строениями (применительно к средней полосе ЕЧ РФ) показывает, что от объема и вида затрат можно прийти к различным показателям работоспособности и срока службы. Например, уменьшение интервалов между профилактическими работами отодвигает срок выполнения ремонтных работ (увеличивается работоспособность) и увеличивает соответственно общий срок службы. Так же увеличивает работоспособность и своевременное выполнение ППР, затраты на что выше затрат на уход и профилактику, но значительно ниже затрат на ремонт. Наибольший срок службы при наименьших затратах дают стратегии эксплуатации №8 ($T_{ст}=70$ лет; $C_A=0,0348$ и $C_B=0,0017$) и №10 ($T_{ст}=95$ лет; $C_A=0,0358$ и $C_B=0,0015$), которые не предусматривают работ по ремонту.

Но чтобы прийти к такой схеме эксплуатации (без ремонта) нужно постоянно отслеживать состояние сооружения, поскольку эффект от реализации предложенной модели лежит в "своевременности" и "достаточности" мероприятий. И в этом суть регулирования процесса содержания мостовых сооружений.

На основе выделенных стратегий содержания мостовых сооружений, возникает задача наиболее эффективного расходования финансовых средств, выделяемых эти цели, то есть учитывая, что размер затрат на содержание моста зависит от приятного варианта его содержания, то возникает задача выбора варианта содержания для каждого мостового сооружения в рамках выделенного на эти цели бюджета. Понятно, что эффективность расходования отпущенных средств будет определяться уровнем долговечности, обслуживаемых на эти средства, мостовых сооружений. Выше было показано, что долговечность

сооружения напрямую зависит от режима его содержания. Было показано, что при условии своевременного выделения средств возможно продление срока эксплуатации мостовых сооружений за счет проведения работ по его содержанию. Было выявлено десять возможных вариантов содержания мостовых сооружений, каждый из которых характеризуется различным уровнем затрат и, естественно, различными уровнями долговечности.

Таким образом, каждый мост характеризуется конкретным вариантом содержания, затратами, необходимыми на реализацию этого варианта и долговечностью сооружения, которая достигается при принятом варианте содержания.

Был построен комплекс моделей позволяющих определить рациональную стратегию содержания по каждому конкретному мостовому сооружению и определено множество Парето – оптимальных решений по критериям долговечности и совокупных затрат.

В третьей главе рассматривается комплекс моделей, позволяющих формировать оптимальный план ремонтных работ мостовых сооружений при минимальных значениях ущерба, как на текущий период, так и в процессе перспективного планирования, охватывающего несколько плановых периодов.

I. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗМЕНЕНИИ СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В РОССИИ

1.1. Состав парка мостов

Количество и протяженность мостов на общей сети дорог ежегодно меняется, в связи с чем приводимые статистические данные справедливы для конкретного года статистической отчетности и могут не соответствовать другим опубликованным данным. В тоже время, относительные показатели имеют большую достоверность и более стабильны во времени, поэтому их использование для качественной и количественной оценки парка мостов представляется вполне допустимой и наиболее объективной. Именно поэтому в работе преобладают относительные показатели.

Всего на дорогах общего пользования России эксплуатируется 41,8 тыс. мостов, в том числе капитальных - 33,5 тыс. шт., протяженностью около 1500 км [2, 150]. В основном это железобетонные мосты (мосты полностью или частично с железобетонными пролетными строениями), число которых составляет 29,5 тыс. шт. (табл. 1.1.1).

В общем числе железобетонных пролетных строений большая часть представляет собой ребристые конструкции с обычной арматурой - с диафрагмами и без диафрагм. Причем процент бездиафрагменных пролетных строений постоянно возрастает (табл. 1.1.2) за счет преимущественного их применения в течение последних 20 лет. Даже по сравнению с данными 1995 г. соотношение между диафрагменными и бездиафрагменными существенно изменилось. Это свидетельствует о том, что конструкции 50^х-60^х годов разработки практически все заменены на современные (бездиафрагменные) конструкции.

Одновременно с этим возрос процент пролетных строений с напрягае-

мой арматурой. В последние годы с напрягаемой арматурой применяли и балки длиной 18м, 15м, а иногда и 12м, что традиционно раньше было областью применения каркасных балок.

Немногим более 8% (по количеству) приходится на мосты с металлическими или сталежелезобетонными пролетными строениями (3500 шт.) Эти мосты включают около 8,4 тыс. пролетных строений общей длиной 245км. В основном это балочные пролетные строения со сплошной стенкой (-75%) и прокатными стальными балками (-20%). Их число не только не сокращается, но постепенно возрастает, хотя и не такими темпами как железобетонных пролетных строений с напряженной арматурой [141].

Таблица 1.1.1

	Количество		Протяженность		Средняя длина моста, м
	тыс. шт.	%	км	%	
Всего мостов на общей сети	41,8	100	1600	100	38,3
Из них:					
- Капитальные	33,5	80,1	1500	93,7	44,8
в т.ч.:					
а) железобетонные	29,5	70,6	1245	77,8	42,2
б) стале-ж/б и стальные	3,5	8,4	245	15,3	70,0
в) бетонные и каменные	0,5	1,1	10	0,6	20,0
- Деревянные		19,9	100	6,5	12,0

Таблица 1.1.2

Тип пролетного строения	Распространенность по числу пр. стр., %			
	по данным на:			
	1980г.	1990г.	1995г.	2000г.
С обычной арматурой	67	65	58	55
в том числе				
- сборные ребристые с диафрагмами	37	25	21	14
- сборные ребристые без диафрагм	22	35	37	37
- плитные	2	1	2	2
- остальные	6	4	3	2
С высокопрочной арматурой	33	35	42	45
в том числе				
- ребристые балочные	23	25	32	36
- плитные	4	4	4	3
- коробчатые и рамные	4	5	5	5
- остальные	2	1	1	1

На автомобильных дорогах общего пользования Российской Федера-

ции остается все еще значительное количество деревянных мостов - 8,3 тыс. шт. или ~ 100 км, что составляет 19,9% от числа и более 6% от общей протяженности искусственных сооружений (см. табл. 1.1.1).

В некоторых областях России процент деревянных мостов существенно выше среднего. Например, их более половины в Алтае, Коми, Бурятии, около 60% в Карелии и Иркутской области, около 70% в Хабаровском крае (726 шт.), Якутии (486 шт.) и Читинской области, то есть в районах, богатых древесиной [150]. В Архангельской области число деревянных мостов превышает 85% от общего числа сооружений области и составляет 843 шт. [2]. Фактически лишь в Московской, Брянской, Калининградской, Кемеровской, Тульской, Орловской и Саратовской областях, а также в Республике Мари Эл и в южных районах ЕЧ РФ проблема деревянных мостов отсутствует из-за отсутствия или малого их количества (менее 1%) на общей сети автомобильных дорог.

Состояние деревянных мостов на общей сети крайне неудовлетворительное. По результатам обследования деревянных мостов в последние годы в Архангельской, Свердловской, Кировской, Вологодской областях более 15% сооружений находятся в аварийном состоянии, а остальная часть требует ремонта.

До сих пор на сети остается большое количество малых мостов (рис. 1.1.1). Со временем число малых мостов уменьшается, хотя и медленно. В основном малые мосты, включая деревянные, расположены на местной сети.

Таким образом, для общей сети характерно:

- постоянное возрастание количества капитальных мостов ежегодным приростом до 3,4% по числу сооружений и до 5,0% по протяженности (рис. 1.1.2);
- заметное снижение прироста сооружений с 1998 г., когда более приоритетным стало не развитие сети дорог, а их совершенствование (до 1,4--1,5% в год по числу сооружений и до 3,4-7-4,1%

- по протяженности);
- незначительное увеличение средней длины $L_{\text{ср}}$ мостов (табл. 1.1.3);
 - постоянное снижение числа и протяженности деревянных мостов (с 15 тыс. шт. и 160 км в 1991 г. до 8,3 тыс. шт. и 100 км в 2000 г.), и все же сохранение районов, где число деревянных мостов превышает 50% - в основном на территориальных дорогах;
 - неуклонное увеличение процента капитальных мостов в общем числе и протяженности сооружений (рис. 1.1.3) с сохранением высокого процента железобетонных пролетных строений (88%);
 - постоянное увеличение пролетных строений с напрягаемой арматурой, число которых на сети приблизилось к числу железобетонных конструкций с каркасной арматурой;
 - значительное количество малых мостов, процент которых постепенно снижается, тогда как процент больших мостов неуклонно возрастает.

Однако для мостовых сооружений федеральной сети дорог ситуация несколько иная, иные отсюда и акценты. Прежде всего это касается деревянных мостов, которые практически все уже перестроены (табл. 1.1.4).

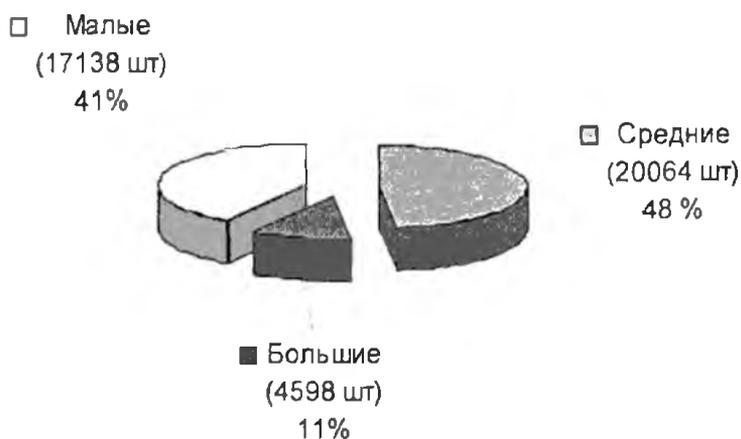


Рис. 1.1.1.

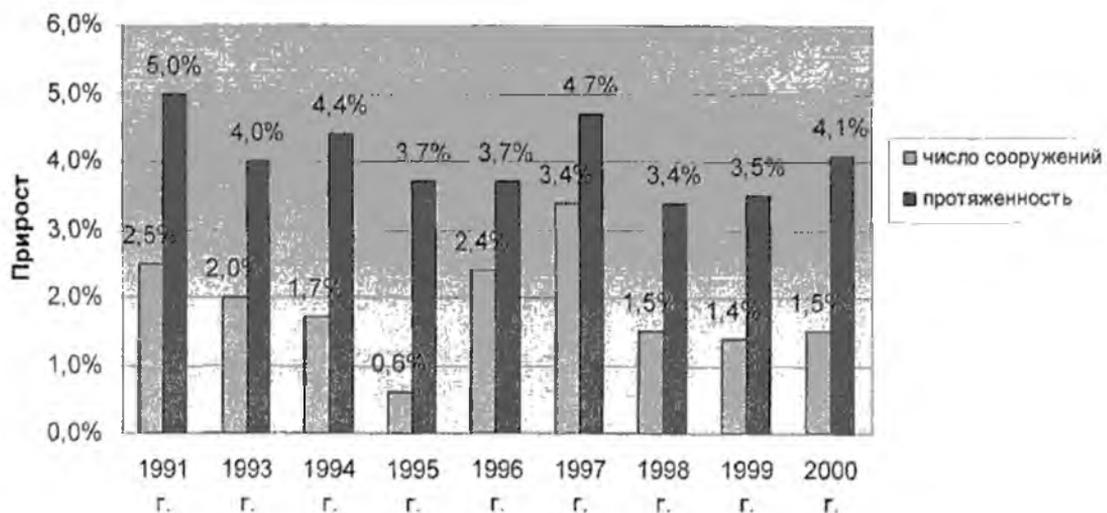


Рис. 1.1.2.

Таблица 1.1.3

Наименов. показателей	Едини-измер.	По состоя- на 01.01 соответствую- года							
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Мосты (путь-проводы)	шт.	367898	37545	37761	38675	39987	40603	41182	41900
	пог. м	1251969	1295096	1333326	1398814	1455158	1496639	1542596	1599989
том числе деревянные	шт.	11504	10947	10136	9799	9431	9067	8623	8336
	пог. м	120792	117133	111496	110729	108456	104270	101320	100032
	$L_{ср}$, м	10,5	10,7	11,0	11,3	11,5	11,5	11,75	12,0
Капитальные	шт.	25394	26598	27625	28876	30536	31536	32559	33464
	пог. м	1125425	1174679	1218789	1286125	1346701	1392368	1441276	1500000
	$L_{ср}$, м	43,9	44,2	44,1	44,5	44,1	44,1	44,3	44,8

Таблица 1.1.4

Наименование показателей	Едини-измер.	По состоя- на 01.01 соответствую- года							
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Мосты (путь-проводы)	шт.	4468	4578	4607	4990	5168	5284	5388	5594
	пог. м	237727	244749	249635	280624	291012	294295	301607	323170
ном числе деревянные	шт.	164	174	165	146	109	97	84	82
	пог. м	1968	2227	2227	1986	1526	1377	1235	1230
	$L_{ср}$, м	12,0	12,8	13,5	13,6	14,0	14,2	14,7	15,0
капитальные	шт.	4304	4424	4442	4844	5059	5187	5304	5512
	пог. м	235759	242522	247408	278638	289486	292918	300372	321940
	$L_{ср}$, м	54,8	54,8	55,7	57,5	57,2	56,5	56,6	58,4

Следовательно, на современном этапе исключается содержание и ре-

монт деревянных мостов и сохраняется линия на постепенную их замену на капитальные, что в первую очередь требуется в Упрдоре "Лена" (41 соор.) и ГУПАД "Колыма" (23 соор.).

Совершенно иное имеем распределение мостов и по длинам (рис. 1.1.4):

- процент малых мостов не превышает 20%, а больших мостов - приближается к 30%;
- в последние годы увеличилось число внеклассных сооружений (сегодня их 25шт., тогда как даже в 1995г. их было всего 5 шт.).

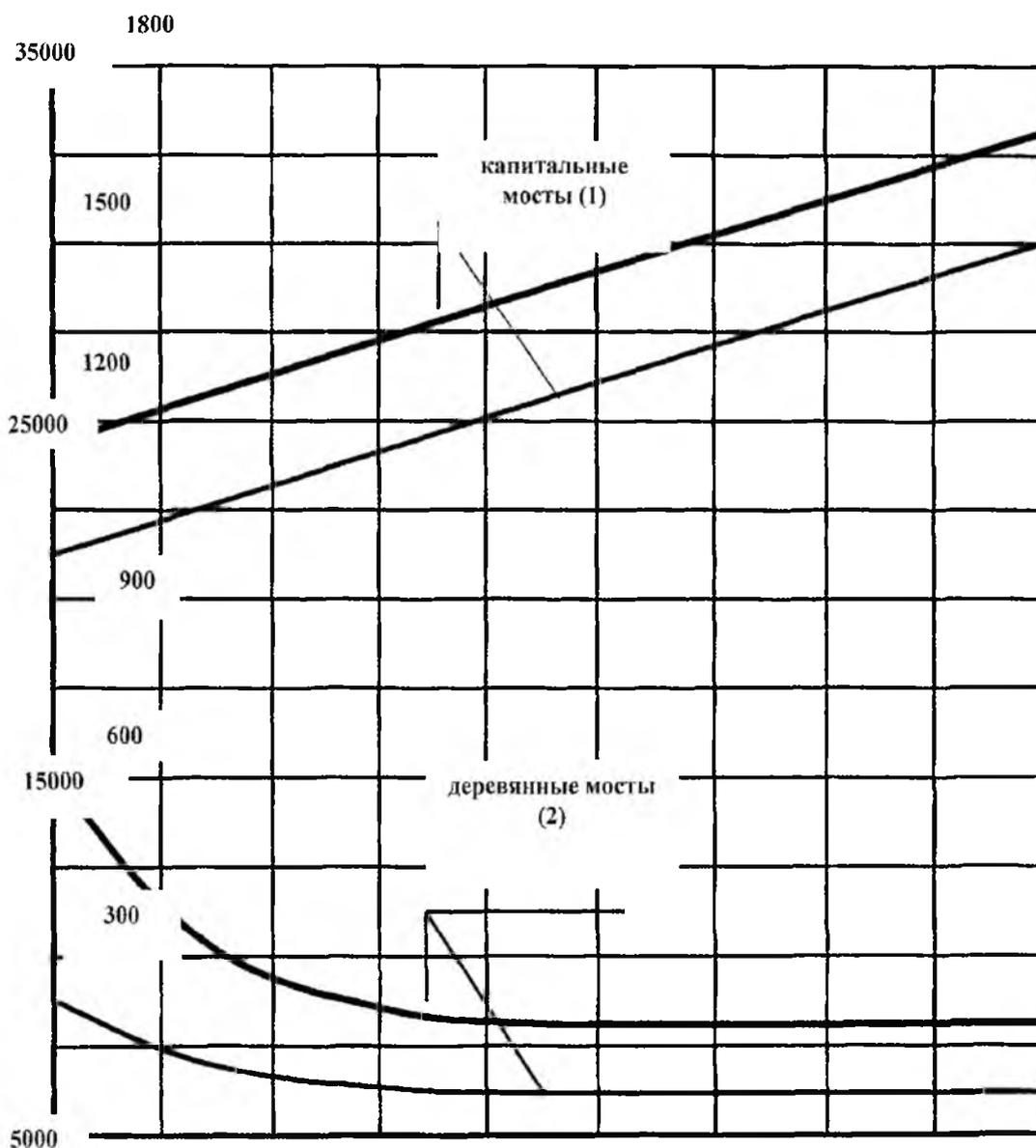
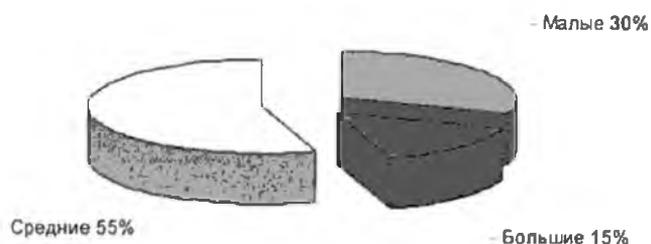
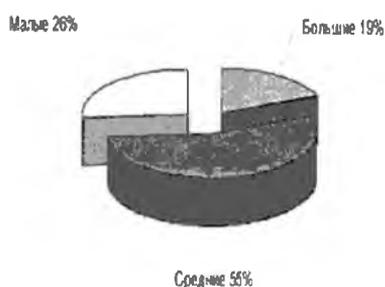


Рис. 1.1.3.

Число мостов разной длины 1990 г.



Число мостов разной длины в 2000 г.



Распространенность мостов по материалу в 2000 г.

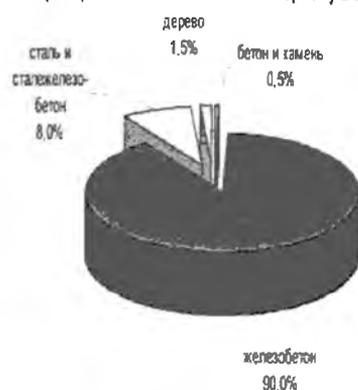


Рис. 1.1.4.

Следовательно, актуальность работ, направленных на содержание малых сооружений снижается. Появляется новая группа забот - большие и, в первую очередь, внеклассные мосты, для которых должны разрабатываться специальные требования по эксплуатации и соответствующие нормативные документы.

На федеральной сети сохраняется преимущественное число железобетонных мостов (табл. 1.1.5). Число железобетонных пролетных строений с напряженной арматурой примерно равно числу пролетных строений с обычной арматурой. Наибольшее число пролетов имеют длину 15 - 18м - здесь как ребристые, так и плитные пролетные строения (рис. 1.1.5). Наиболее распространены пролетные строения длиной от 12 до 24м (75%; 16600 шт.), то есть цельноперевозимые конструкции, что важно при планировании затрат на замену балок или пролетных строений целиком [152].

Таблица 1.1.5

Данные о мостовых сооружениях	Количество		Протяженность		Средняя длина моста, м
	шт.	%	км	%	
Всего	5594	100	323,17	100	57,8
из них:					
- Капитальные, всего	5512	98,5	321,94	99,6	58,4
в т.ч.:					
а) железобетонные	5034	90,0	267,38	82,7	53,1
б) стале-ж/б и стальные	450	8,0	54,00	16,7	120,0
в) бетонные и каменные	28	0,5	0,56	0,2	20,0
- Деревянные	82	1,5	1,23	0,4	15,0

1.2. Состояние мостовых сооружений на федеральной сети

Анализ состояния мостовых сооружений на федеральной дорожной сети будем проводить согласно требований ВСН-4-81 [64], предусматривающих оценку по трем показателям: безопасности движения и пропускной способности; грузоподъемности; долговечности.

Комплексный (обобщенный) показатель состояния мостового сооружения будет оцениваться по трехбальной шкале (хорошее, удовлетворительное и плохое состояние), традиционно используемой в России. Причем, в неудовлетворительное состояние входят и аварийные мосты.

По критерию пропускной способности состояние мостов, согласно действующих нормативных документов оценивается только по величине габарита. В качестве требуемого (достаточного) габарита принимаются значения, приведенные в СНиП 2.05.03-84 [140] с учетом допустимого снижения ширины полосы безопасности. Сопоставляя требуемый и фактический габариты (табл. 1.2.1), можно прийти к следующим выводам:

➤ недостаточный габарит имеют более половины сооружений на федеральной сети; причем до 1995 г. в половине из "узких мостов" дефицит габарита был близок к 100% (т.е. фактически габарит вдвое меньше требуемого).

➤ Согласно современным представлениям о безопасности движения, снижение габарита вдвое можно отнести к аварийной ситуации. Следовательно, к аварийным сооружениям можно отнести и те, у которых фактиче-

ский габарит в 1,6-1,8 раз меньше требуемого.

Таблица 1.2.1

Категория дороги (число полос)	Количество И.С. с габаритом													
	>19м		14,1-		10,1-14м		8,1-10м		7-8 м		<7м		Итого	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
А. На 1.01.97г.														
I (4 и более)														
II(2)	-	-	14	4,7	391	12,7	400	13,0	621	20,3	69	2,2	1628	52,9
III(2)	-	-	13	0,4	177	5,7	425	13,9	444	14,4	83	2,7	1142	37,1
Итого по "А"	89	2,9	250	8,1	635	20,6	863	28,1	1085	35,3	154	5,0	3076	100
Б. На 1.01.2000г.														
I (4 и более)														
II(2)	-	-	15	5,3	400	14,1	550	19,2	400	14,0	-	-	1500	52,6
III(2)	-	-	10	0,3	165	5,8	500	17,6	400	14,0	25	0,9	1100	38,6
Итого по "Б"	125	4,4	250	8,8	595	20,9	1055	37,0	800	28,0	25	0,9	2850	100

Следует так же отметить, что оценка по пропускной способности и безопасности достаточно субъективна и этот фактор препятствует использованию данной методики в качестве основы планирования. Вместе с тем необходимо принять к сведению, что критерий безопасности движения является комплексным, то есть зависящим от целого набора параметров, таких как состояние покрытия, сопряжения с насыпью, деформационных швов, а также конструкции и состояние ограждений, тротуаров и перил и, конечно же, габаритов. Поэтому при оценке состояния мостового сооружения сводить все только к оценке одного из параметров, может являться источником вероятных ошибок при планировании ремонтных работ.

В настоящее время определилась тенденция роста числа реконструируемых и ремонтируемых мостовых сооружений с увеличением их габаритов. Резкое снижение числа мостов с недостаточным габаритом на федеральной сети началось с 1990 г. Это связано с формированием нового подхода к содержанию мостовых сооружений, предусматривающего новую оценку состояния и прогноз изменения этого состояния во времени [151], что было закреплено в соответствующем нормативном документе "Инструкция" по уширению [65]. Этим объясняется сокращение вдвое за период 1990-1995 г. числа сооружений с чрезвычайно малым габаритом, способным вызвать

аварийную ситуацию [139], а к 2000г. подобные сооружения практически все были перестроены (рис. 1.2.1). Но, тем не менее, на сети остается не менее половины мостов с недостаточным габаритом.

Такой параметр оценки мостовых сооружений как грузоподъемность является в достаточной мере объективным [66]. В настоящее время наметилась позитивная тенденция к уменьшению на сети числа мостов со старыми проектными нагрузками (табл. 1.2.2). Это позволяет сделать вывод о том, что в ближайшем будущем придется иметь дело с мостами, запроектированными только на современные или близкие к современным нагрузкам, что делает эти конструкции более технологичными с точки зрения организации ремонтных работ и упрощает процесс планирования ремонта, реконструкции и перестройки.

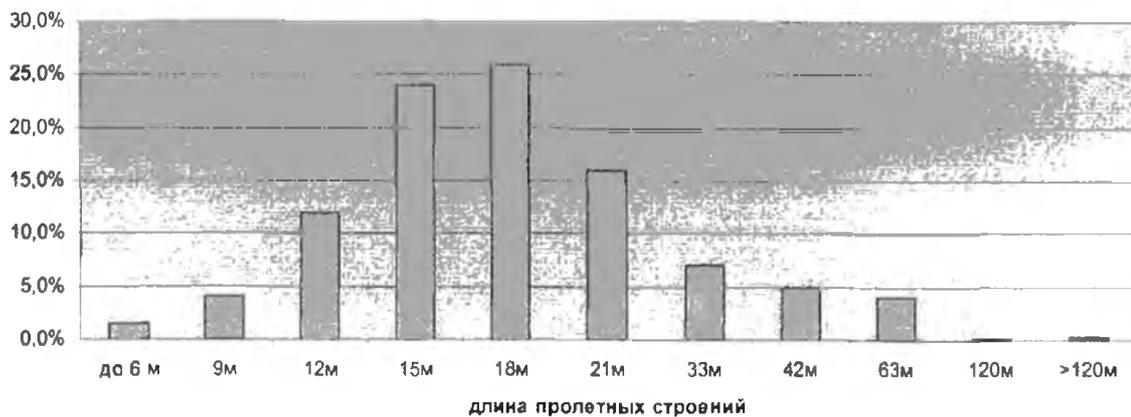
Таблица 1.2.2

Проектная нагрузка	Н-8 и НГ-30 Н-10 и НГ-30	Н-10иНГ-60 Н-13 иНГ-60	Н-30(А11)иНК-80 Н-18иНК-80
Процент сооружений, % на годы:			
1990	~3	42	55
1995	~2	32	66
1997	~1	26	73
1999	~1	21	78
2000	<1	<20	>80
прогноз на 2005	0	<5	>95

Но низкое качество конструкций, характеризуемое наличием в них дефектов, влияющих на несущую способность и грузоподъемность, резко изменяет картину в целом, хотя положительная тенденция сохраняется.

При этом следует иметь ввиду, что парк мостовых сооружений с существенно (>10%) сниженной грузоподъемностью составляет примерно 35% (табл. 1.2.3). Вместе с тем необходимо отметить, что по современным представлениям снижение грузоподъемности моста до 15 т может быть приравнено к аварийному состоянию. Таких мостовых сооружений на 2000 г. было примерно 7,5%, что почти в 6 раз меньше по сравнению с 1984 г. Однако, для 25% мостов реально обращающиеся автомобильные (не специальные!)

нагрузки могут оказаться критическими.



длина пролетных строений, м	до 6 м	9 м	12 м	15 м	18 м	21 м	33 м	42 м	63 м	120 м	>120 м
число пролетных строений, шт	300	800	2400	4800	5200	3200	1400	1000	800	40	60
Доля, %	1,5%	4,0%	12,0%	24,0%	26,0%	16,0%	7,0%	5,0%	4,0%	0,2%	0,3%

Рис. 1.2.1

Таблица 1.2.3

Масса эталонного грузовика, т	до 10	11-15	16-20	21+25	26-30	>30
Процент мостов по годам:						
- 1984	17,0	12,0	16,0	11,0	27,0	7,0
- 1990	12,0	10,0	14,5	8,5	40,0	15,0
- 1995	5,0	6,0	13,0	5,5	52,5	18,0
- 1998	3,0	6,5	12,5	7,5	50,5	20,0
- 2000	2,5	5,0	17,5	10,0	45,0	20,0

Проводимые мероприятия по замене и ремонту (усилению) морально и физически устаревших мостов давних лет постройки дали эффект в виде уменьшения процента аварийных мостов по показателю грузоподъемности. В то же время статистические данные фиксируют медленный рост числа мостов, не требующих усиления, то есть грузоподъемность более 25 т. Здесь основными причинами являются с одной стороны недостатки существующих нормативных документов [66, 67], а с другой - отсутствие должного управления мостовым хозяйством. Это подтверждает и сопоставление сооружений по обобщенному показателю состояния - общей оценке.

Тот факт, что в течение многих лет практически не уменьшается число мостов с оценкой "неудовлетворительно" и не возрастает число мостов с оценкой "хорошо" (табл. 1.2.4) может найти объяснение только в несовершенной системе управления эксплуатацией мостовых сооружений. В тоже время, снижение до минимума аварийных мостов (не более 1%) к 2000 г. (рис. 1.2.2) вселяет определенный оптимизм в возможность существенного повышения на современном этапе эффективности существующей системы управления эксплуатацией мостов.

Состояние мостового сооружения по критерию долговечности, выполняется в соответствии с ВСН-4-81 [64]. Существующая методика получения этого показателя так же имеет высокую степень субъективности. В частности, субъективно (на основании личного опыта обследователя) оцениваются:

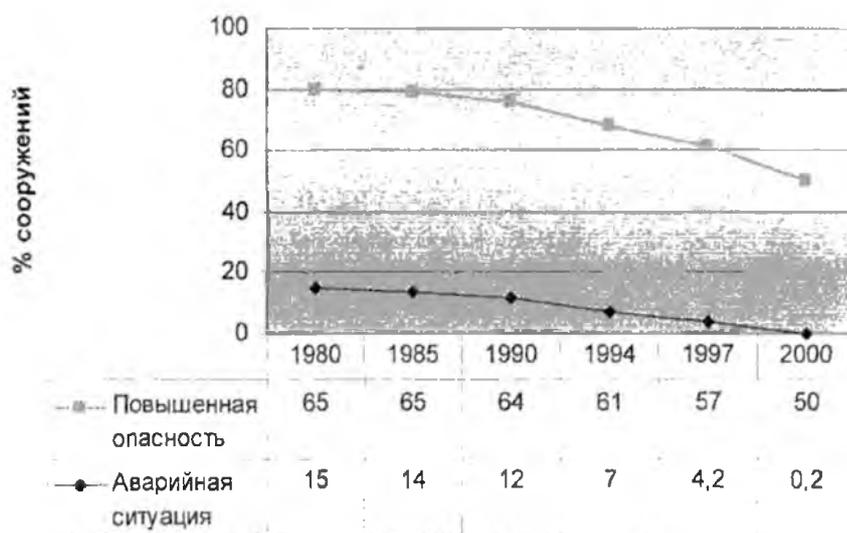


Рис. 1.2.2

- наличие дефектов, снижающих срок службы сооружений или их несущих конструкций (качественная оценка);
- количество (процент) элементов с дефектами;
- распространенность дефектов.

Таблица 1.2.4

Годы	Количество мостов			
	«хорошо»	«удовлетвор.»	«неудовлетвор.»	«аварийное»
1980	27	53	16	4
1986	25	50	20	5
1993	25	51	20	4
1995	23	53	19	5
1997	22	57	18	3
2000	23	58	18	-1

К сожалению, до настоящего времени отсутствуют официально принятые критерии оценки долговечности. Естественно, что получение такой оценки на основе объективных исследований является крайне важной задачей так как в противном случае не возможно правильно спланировать работу по содержанию мостового сооружения на будущее (особо следует подчеркнуть, что речь идет о значительных промежутках времени исчисляющихся десятилетиями). Сегодня оценку по остаточному сроку службы, то есть по долговечности, все, кто осматривают мостовые сооружения, дают, опираясь только на свой личный опыт. Поэтому такая оценка имеет очень низкую достоверность.

Но несмотря на все недостатки используемой методики оценки долговечности, можно сказать, что реальный срок службы или работоспособность остаются очень низкими и увеличиваются очень медленно. Это видно по двум показателям: достигнутому возрасту сооружения к моменту его замены; достигнутой работоспособности сооружения. Так например, в России к началу 90-х годов при подобном подходе к определению срока службы возраст замененных сооружений в среднем находился в интервале 40-50 лет, то есть имела место ежегодная замена сооружений в объеме 2 - 2,5%. При этом имели место и случаи замены как в 15 лет, так и в 70 лет [150].

Довольно – таки интересен результат обработки данных о состоянии однотипных сооружений в возрасте 20-25 лет, эксплуатирующихся примерно в одинаковых условиях (Центральный район). В табл. 1.2.5 приведены дефекты таких мостов и их распространенность. Из таблицы следует, что сооруже-

ния с такими дефектами и наличием многих дефектов, имеющих в подавляющем большинстве сооружений (в элементах мостового полотна, в плитах, на фасадных поверхностях, в крайних балках, в опорных узлах), уже в 20-25 лет требовали капитального ремонта. Причем причинами появления и развития дефектов являлись как несовершенство конструкций, так и ошибки при строительстве и эксплуатации.

Таблица 1.2.5

№	Обнаруженное повреждение (дефект)	Причины появления	Распространенность, %
	Гр. I. Проезжая часть, ездовое полотно		
1.	Протекание воды под тротуарные блоки и на фасад балок	с, к	50
2.	Разрушено перильное ограждение (крепление, заполнение.)	с, э	-10
3.	Разрушены деформационные швы	к, э	83
№	Обнаруженное повреждение (дефект)	Причины появления	Распространенность, %
4.	Выбоины в покрытии, поврежден защитный слой	э	68
5.	Отсутствие надлежащего водоотвода (не выдержаны уклоны)	с, э	-70
6.	Не функционируют водоотводные трубки	э	-80
7.	Разрешение бордюров	э	25
8.	Проломы в тротуарных плитах	э	12
9.	Увеличена толщина покрытия на 10см и более	э	-50
	Гр. II. Дефекты железобетонных поверхностей		
10.	Протечки, выщелачивание бетона плиты между балками	к, с	63
11.	Оголение и коррозия хомутов в ребрах балок	к, с	-40
12.	Разрушение защитного слоя по фасаду балок	к, с	50
13.	Разрушение бетона консолей тротуаров и плит балок	к, э	50
14.	Трещины вдоль арматуры в нижней зоне балок с оголением арматуры	к	23
15.	Вертикальные и наклонные силовые трещины в ребрах балок	э	13
16.	Продольные трещины в сопряжении ребер и плит балок	к	4
17.	Коррозия основной арматуры в крайних балках	к, э	11
	Гр. III. Опорные узлы		

18.	Сколы бетона в торцах балок с оголением арматуры	к	16
19.	Сколы бетона ригеля в месте опирания балок	к	11
20.	Значительная коррозия арматуры конца балок	с	8
21.	Значительная коррозия опорных частей	э	65
22.	Загрязнение опорных площадок	э	70
	Гр. IV. Дефекты поперечного объединения		
23.	Несовпадение диафрагм сборных блоков	к	13
24.	Отсутствие омоноличивания диафрагм	с	12
25.	Трещины в диафрагмах	к	-10
26.	Трещины в плите (продольные)	с,к	~5
27.	Разрушены участки плит на концах пролетных строений	э	8

Примечание:

- К - несовершенство конструкций, недостаточное качество конструктивной проработки; С - недостатки строительства, изготовления конструкций; Э - недостатки эксплуатации, появления повреждений из-за естественного старения при эксплуатации или пропуска сверхнормативной нагрузки.

*) Показан процент пролетных строений, в которых обнаружен дефект.

Если проанализировать работоспособность сооружений, то можно сделать вывод о том, время службы мостовых сооружений до проведения ремонта на момент 1985-95 г.г. составит примерно 20 лет. Учитывая, что процент мостов с неудовлетворительным состоянием дает возможность определить по графику "возраст мостов" их срок службы, правда с невысокой точностью, а процент мостов с оценкой "хорошо" дает возможность определить работоспособность сооружения (срок жизни без ограничений), то получаем следующую картину представленную данными табл. 1.2.6):

Анализируя данные табл. 1.2.6 можно сделать вывод о том, что незначительное увеличение срока службы и работоспособности заметно лишь за последние 5 лет. При этом следует иметь в виду, что при указанном подходе к определению срока службы допустима только качественная оценка. Это вызвано очень низкой объективностью принятого сегодня подхо-

да к оценке состояния сооружений.

Годы	1980 [150]	1986	1991 [150]	1995 [139]	2000 [152]
Работоспособность, лет	26	19	22	18	26
Срок службы, лет	40	35	37	37	49

Таблица 1.2.6

Годы	Количество мостов в юзросте, %						
	До 10 лет	<20 лет	<30 лет	<40 лет	<50 лет	<60 лет	>60 лет
1980	7	17	31	25	12	5	3
1986	8	18	32	28	8	4	2
1991	10	20	27	26	10	5	6
1996	10	22	28	26	8	4	2
2000	10	10	18	27	15	13	7

1.3. Тенденции развития управления эксплуатацией мостовых сооружений

В результате анализа особенностей состояния мостовых сооружений оказалось возможным установить тенденции и определить проблемы, с которыми придется сталкиваться в процессе эксплуатации изучаемых объектов. В частности установлено следующее [141].

➤ Предполагается, что управление мостами в основном затронет мостовые сооружения, включающие: сборные железобетонные ребристые пролетные строения с обычной арматурой без диафрагм; сборные железобетонные пролетные строения с напряженной арматурой; монолитные железобетонные пролетные строения; сталежелезобетонные пролетные строения с монолитной и сборной плитой.

➤ Количество малых мостов постепенно снижается и в настоящее время их число незначительно и не требует больших затрат на содержание и ремонт.

➤ Возрастает число внекласных сооружений, к которым потребуются особое внимание, в первую очередь в части содержания, и разработка специальных нормативных документов.

➤ Требуется пополнения нормативно-методическая часть системы эксплуатации, для которой необходима разработка: новых критериев оценки состояния (количественная оценка по показателю безопасности и объектив-

ная оценка по грузоподъемности); нового подхода к оценке долговечности, предусматривающего объективную (а не субъективную!) оценку по сроку службы [141].

➤ Качество сооружений меняется к лучшему очень медленно, из-за чего потребуются принятие мер, направленных на: снижение числа мостовых сооружений оценкой "неудовлетворительно"; увеличение числа мостовых сооружений с оценкой "хорошо"; исключение аварийных мостов; существенное снижение числа "узких" мостовых сооружений.

➤ Достигнутый срок службы крайне недостаточен, в связи с чем потребуются меры, обеспечивающие: повышение качества строительства и ремонта за счет организации технического надзора (сопровождения) [141]; повышение качества проектной документации, за счет научно-технического сопровождения проектов и их обязательной экспертизы [141].

➤ Большинство из эксплуатируемых мостовых сооружений рассчитаны на нагрузки, близкие к современным, что увеличивает число ремонтно-пригодных сооружений.

Естественно, что эксплуатация мостовых сооружений должна носить организованный характер и для выполнения задач, порождаемых в процессе эксплуатации мостов, необходима некая организационная структура, поэтому в 1970-72 годах предпринимается попытка создания службы эксплуатации мостов в России, подразумевающая выполнение двух задач:

- сбор информации о мостах;
- принятие решения на основании обмена и анализа информации.

Вся информация заносилась в Базу данных (БДМ), которая содержала данные о мостах на автомобильных дорогах общегосударственного, республиканского и областного значения на территории России. Объем информации был принят соответствующим объемом информации в карточках на мосты, которые имелись в дорожных хозяйствах на местах и включали 54 показателя. В число показателей входили характеристики, описывающие положение моста на дороге, перекрываемое препятствие,

ледовый режим реки, основные геометрические параметры моста, его нормативную нагрузку, годы постройки, последнего ремонта и обследования моста, схему сооружения и характеристику его пролетных строений, опор, ледорезов, регуляционных сооружений и технического состояния моста [137]. Обновление информации о мостовых сооружениях осуществлялось ежегодно на основе сведений, подаваемых эксплуатационными организациями.

Основной задачей службы была оперативная подготовка текущей информации о мостах, с помощью которой принималось в достаточной мере субъективное решение по поводу важности того или иного мероприятия, связанного с содержанием мостовых сооружений.

На основе созданной базы данных представлялось возможным получение сведений о мостах в виде полной или частичной информации о конкретных сооружениях на отдельных участках дороги, в целом по дороге, по всем дорогам области, района или дорожной отрасли, а также скомпонованную информацию по различным признакам для получения статистических данных о мостах.

Управление эксплуатацией заключалось в определении для эксплуатационных организаций условий пропуска по мостам тяжелых транспортных средств и предложений по плану ремонта и перестройки мостов, исходя из выделенных средств. В таком виде система просуществовала 11 лет.

На этом этапе выявились основные недостатки создаваемой службы эксплуатации мостов. Главным недостатком было то, что принятие решения (например, при планировании затрат) базировалось только на констатации существующего состояния о мостах без прогноза изменения этого состояния во времени. В результате, как правило, не было возможности заранее планировать средства и виды работ и тем более регулировать оптимальное распределение выделяемых средств.

Вторым существенным недостатком была субъективная оценка состояния мостов в БДМ, вызванная тем, что ежегодное обновление Базы вы-

полнялось субъектом управления, то есть фактически Заказчиком. Это порой приводило к таким явлениям, когда состояние мостовых сооружений с каждым годом улучшалось или перманентно улучшалось - ухудшалось без изменения затрат на содержание.

Для определения направлений, по которым должна быть перестроена служба эксплуатации мостовых сооружений был выполнен анализ состояния мостовых сооружений на общей сети автомобильных дорог, анализ зарубежного опыта создания аналогичных систем и анализ управленческих сигналов (решений) в мостовой подотрасли страны.

Современные условия характеризуются тем, что во-первых весь мир понял важность и необходимость развивать существующие службы управления, поскольку только в этом случае представляется возможным реально повысить срок эксплуатации сооружений, рационально расходовать бюджетные средства, регулировать уровень финансирования содержания и ремонта. Россия так же накопила определенный опыт в этой проблеме.

Современные условия, кроме того, характеризуются определенными позитивными изменениями в политике в области мостостроения.

Таким образом, можно выделить следующие особенности российской Модели системы управления мостами:

- трехуровневая система с обратной связью;
- наличие базы данных о мостах;
- формирование нормативной базы;
- наличие научно-методической основы для реализации решений в области содержания, ремонта и реконструкции;
- возможность регулирования процесса содержания;
- взаимосвязь между всеми видами работ (уход, профилактика, ПОР, ремонт, реконструкция, перестройка);
- взаимосвязь работ по надзору с ремонтно-восстановительными работами;

- наличие нового подхода к оценке состояния МС через показатели износа элементов;
- имеющаяся возможность реализации (освоения) системы прогнозирования состояния и расчетного определения остаточного ресурса;
- имеющаяся возможность определения приоритетности капитальных вложений;
- наметившийся новый подход к системе надзора.

Внедрение такой модели эксплуатации мостовых сооружений внесло свой вклад в имеющиеся определенные позитивные сдвиги в состоянии мостов на федеральных дорогах, в эффективности использования расходуемых средств и в повышении срока службы (см., например, табл. 1.3.1 и 1.3.2). И хотя за последние пять лет резкого улучшения не отмечается, тем не менее, тенденция просматривается отчетливо, что дает основание считать вполне приемлемой принятую идеологию эксплуатации мостовых сооружений, во главе которой стоит представленная модель управления эксплуатацией.

Таблица 1.3.1

Существующий габарит, м	Категория дороги	Число сооружений по годам				
		1995	на 1.01.1997	на 1.01.2000	середина 2000г	Перспектива(2010г)
<7м	I (4 пол.)	1590	2	0 0	0 0	0
	II III	Ю	69	25	10	0
			83			0
> 7 до 8м	I II	25	20	0	0	0 0 -
	III	650	621	400	350	100
		450	444	400	375	
> 8 до 10м	I II	40	38	5	0	0 -
	III	400	400	550	400	100 -
		425	425	500	450	200

В частности, существенно изменилась и продолжает улучшаться ситуация с "узкими" мостами. За три года удалось свести к минимуму (почти к нулю) число "аварийных" мостов по критерию "Габарит" и значительно уменьшить число мостов с "неудовлетворительным габаритом" (см. табл. 1.3.1).

Произошли изменения и в достигнутом сроке службы сооружений, который теперь можно определять значительно точнее, чем раньше. Так используя вероятностный подход к определению фактического срока службы и учитывая при этом значения износа элементов и сооружений в целом, что на сегодня можно делать достаточно точно, можно считать достигнутым в 2001г. пятидесятилетний рубеж в сроке службы мостовых сооружений федеральной сети (табл. 1.3.2) [141].

С достаточной степенью точности можно определить показатель $T_{сл}$ на 2005 г. и очень приближенно - на 2010. Так, если сохранять приоритетное вложение средств в сооружение, выполнять ремонты в оптимальные сроки и перестраивать сооружения только при достижении ими предельного износа, реальный срок службы к 2005 г. может составлять 56 лет, а к 2010г. - 60 лет. Вполне возможно, что для увеличения темпа изменения качества сооружений после 2010 года придется внести коррективы в принятую се-

Таблица 1.3.2

Годы	Процент МС с предельным износом (>50%)	Срок службы $T_{сл}$, годы
1980	~40	~33
1985	~40	~35
1990	~35	~35
1991	35	35
1995	25	39
1999	16	44
2000	13	47
2001	10	50

годня концепцию совершенствования мостового хозяйства и повысить их надежность и на стадии проектирования (например, за счет увеличения начального резерва - корректировка СНиП).

Собираемая информация по мостам должна способствовать обеспечению реализации конечной цели - своевременного выполнения на практике всех необходимых (экономически обоснованных) работ по содержанию, ремонту и реконструкции МС. То есть, на первое место выходит требование получения из БДМ такой информации, которая позволит правильно спланировать распределение затрат. В частности, эта информация должна быть та-

кой, чтобы на ее основе можно было бы управленцу принять следующие решения:

А). Режим эксплуатации - должна быть определена наибольшая масса транспортного средства и безопасная скорость его движения по мосту. То есть, кроме показателя фактической грузоподъемности Q следует знать и показатель $V_{без}$, определяемый через значения износа элементов мостового полотна.

Б). Вид и объем требуемых восстановительных работ -определяются не только объемы работ, но и рациональные сроки их выполнения.

В). Объем приоритетных капитальных вложений (приоритетные объекты из ранжированных списков и рациональные затраты).

Г). Рациональный уровень затрат на содержание, учитывающий различные темпы износа сооружений по регионам (субъектам) и реально выделяемые средства.

Готовить подобные решения можно только на основе современной компьютерной техники и специальных программных комплексов. Эти программные комплексы должны обрабатывать всю информацию о мостах и давать на выходе несколько вариантов решений. Поскольку на сегодня подобные программные комплексы отсутствуют, в первую очередь из-за несовершенства информации, первоочередной задачей следует считать пересмотр информации, заносимой в БДМ по результатам диагностики и обследования. В качестве новой информации могут быть значения износа всех основных элементов сооружения. Значения износа могут быть определены при диагностике (обследовании) и занесены в БДМ, либо получены расчетным путем из Паспорта на мост. Очень важно при совершенствовании БДМ обратить серьезнейшее внимание на иллюстративную информацию (чертежи, рисунки, графики, фотографии).

Задачей №2 следует считать разработку прогнозных методик для различных конструкций и различного вида прогнозирования -локального или сетевого. Исходными данными для этих методик будут значения износов

элементов сооружений и характер старения материалов (функция деградации) в различных регионах страны при различном уровне загрузки конструкций. В настоящее время "Росавтодором" утверждена первая из серии необходимых прогнозных методик: "Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений мостовых сооружений на автомобильных дорогах".

Требуются аналогичные прогнозные методики для иных пролетных строений, для опор, а также методики прогнозирования:

- транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений;
- изменения состояния сооружения после ремонта (реконструкции);
- работоспособности новых защитных материалов (гидроизоляция, защита бетона).

Важнейшей задачей на современном этапе является завершение формирования нормативной базы на всех уровнях функционирования службы - от сбора информации до реализации решения. Наиболее значимым из требуемых нормативных документов и, фактически, итоговым в цепочке Норм следует считать нормативный документ по планированию затрат на содержание, ремонт, реконструкцию и перестройку мостовых сооружений. Этот документ должен включать разделы, регламентирующие:

- выполнение обоснования потребности средств;
- определение приоритетности капитальных вложений;
- составление планов работ;
- распределение средств между субъектами (Управлениями).

Внедрение норм по планированию (они должны разрабатываться после освоения программ по прогнозированию) фактически будет означать, что создание системы управления эксплуатацией мостов завершено.

1.4. Направления совершенствования эксплуатации мостов

Анализ состояния мостовых сооружений и тенденции его изменения, а также краткий обзор подходов к проблеме эксплуатации мостовых сооружений позволили определить и пути совершенствования существующей службы эксплуатации мостов.

Важным направлением совершенствования является пересмотр всей системы сбора информации. Основными требованиями к сбору и обновлению информации могут быть (с позиции Управления):

- возможность автоматизации (формализации) для решения прикладных задач;
- привлечение только специализированных организаций для сбора и обновления, что позволит повысить достоверность данных;
- пересмотр критериев оценки состояния, уход от традиционной балльной системы при обследовании;
- видоизменение базы данных о мостах, превратив ее из информационной в расчетную.

Важным звеном в управлении и регулировании является прогноз изменения состояния. При этом здесь следует сделать шаг к повышению объективности прогноза, чтобы прогнозирование осуществлялось расчетным путем, а не экспертным. Надо иметь в виду, что без прогноза планирование, а, следовательно, и регулирование, не возможно. Сегодня прогнозирование состояния имеет место лишь в британской и шведской службах управления эксплуатацией мостов, да и то на основании экспертных оценок. Повышение объективности прогноза связано в переходом от экспертного подхода к расчетному.

Не менее важным направлением совершенствования является подкрепление всех решений нормативными документами. Без этого не возможно прийти к единому подходу в оценке состояния сооружений, не возможно обеспечить качество содержания и ремонта, а следовательно - реально повысить срок службы сооружений.

Принимая эти направления совершенствования службы, можно сформулировать и конкретные задачи в этой проблеме.

1. Создание методической и технологической базы ремонта и содержания. Разработка новых материалов, конструкций или конструктивных решений, технологий в области ремонта и содержания.
2. Определение оптимальных затрат на содержание и ремонт. Пересмотр (корректировка) классификации ремонтных работ.
3. Разработка нормативной базы.
4. Более полное и объективное знание состояния МС. Пересмотр оценки состояния, что позволит принимать более правильное решение.
5. Обеспечить возможность сравнения мостов с различным состоянием.
6. Научиться прогнозировать изменение состояния.
7. Разработка инструмента для составления приоритетных списков мостов, требующих дополнительных затрат на содержание, подлежащих ремонту или перестройке.
8. Разработка инструмента для количественной оценки эффективности стратегий эксплуатации.
9. Обеспечить выход на конкретные объекты и получение обратной информации о реализации принимаемых решений.
10. Создать систему надзора, включающую не только осмотры и обследования, но и контроль качества строительства, ремонта и содержания, то есть иметь также и возможность проверять эффективность принятых решений.

Реальность создания новой системы управления, включающей сами объекты и обратную связь в виде информации о выполненных ремонтах и их качестве, появилась лишь в начале 90-х годов, когда фактически, была подготовлена основная часть нормативно-методической и технической базы по созданию службы эксплуатации (содержания, ремонта и реконструкции)

мостов.

К этому времени были разработаны [141]:

- классификация ремонтных работ;
- технологии и технологические карты по профилактике и ремонту;
- рациональные технические решения по усилению и уширению мостов, требования к уширению и реконструкции;
- серия нормативных документов - ВСН и ТУ (по уширению, окраске, ремонту деформационных швов, ремонту мостового полотна, усилению конструкций);
- "Нормали" технических решений по усилению, уширению и ремонту;
- "Руководство" по созданию службы эксплуатации мостов;
- "Нормы" расхода материалов при ремонте;
- "Нормы" денежных затрат на содержание и ремонт мостов. и др. работы.

С 1991 года начато формирование нового Банка данных по мостам с учетом новых требований к нему, определенных новыми задачами, стоящими перед службой эксплуатации и новыми возможностями вычислительной техники. В этот период пересматривается система оценок состояния мостовых сооружений и определяются основные принципы прогнозирования этого состояния [77].

Руководством дорожной отрасли рассмотрены и одобрены эти принципы и рекомендованный подход к реформированию службы управления эксплуатацией мостов.

1.5. Методы дискретной оптимизации

Из предыдущего обзора, следует, что мостовые сооружения представляют собой сложнейшие инженерные сооружения, состояние которых оценивается конечным набором параметров, важнейшим из которых является дол-

говечность. Понятно, что срок службы таких инженерных сооружений исчисляется десятками лет и сильно зависит от режима содержания. Можно предположить, что если своевременно устранять выявленные дефекты, то можно существенно продлить срок службы и отодвинуть срок ремонта моста. Интуитивно понятно, что для различных режимов содержания различными будут и затраты, сопровождающие выбранный вариант содержания и показатель долговечности, соответствующий выбранному варианту. Таким образом, изучаемую предметную область можно представить двумя конечными дискретными множествами: множеством мостовых сооружений и множеством вариантов их содержания.

Таким образом, любые постановки оптимального выбора стратегии содержания или формирования плана ремонтных работ, связанные с рассматриваемой предметной областью, неминуемо приводят нас к необходимости исследования задач на дискретных множествах, то есть задач дискретного программирования.

Рассмотрим основные методы дискретной оптимизации.

Под задачей дискретного программирования понимается задача математического программирования

$$f(x^0) = \min_{x \in G} f(x)$$

множество допустимых решений, которое конечно, т.е. $0 \leq |G| = N \leq \infty$, где $|G|$ - число элементов множества G .

В качестве примера задачи дискретного программирования рассмотрим следующие задачи, как наиболее часто встречающиеся в приложениях:

1. *Задача целочисленного линейного программирования*

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \min, \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1 \dots m; \quad x_j \geq 0, \quad j = 1 \dots n,$$

$$x_j - \text{целые}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad n_1 \leq n$$

Если $n_1 < n$, то задача называется *частично целочисленной*, если $n_1 = n$ - полностью целочисленной.

2. *Задача о ранце.* [44] Имеется n предметов, каждый из которых характеризуется стоимостью $c_j > 0$ и весом $a_j > 0$, $j = 1, 2, \dots, n$. Имеется ранец, грузоподъемность которого равна $R > 0$. Требуется положить в ранец набор предметов с максимальной суммарной стоимостью.

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max, \quad \sum_{j=1}^n a_j x_j \leq R$$

$$x_j \in \begin{cases} 1, & \text{если предмет } j \text{ кладется в ранец} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Выделим следующие группы методов решения задач дискретного программирования:

- метод отсечения для задач целочисленного линейного программирования;
- комбинаторные методы;
- приближенные методы;

Методы отсечения

Основная идея данного метода предложена Гомори [44] и состоит в сведении нерегулярной задачи к решению конечной последовательности регулярных задач. Применительно к задаче целочисленного линейного программирования идея регуляризации позволяет свести решение этой задачи к решению последовательности специальным образом построенных линейных задач. Если полученное решение удовлетворяет условию целочисленности, то процесс окончен. В противном случае к ограничениям исходной задачи добавляется новое линейное ограничение, обладающее двумя свойствами:

- полученный нецелочисленный план не удовлетворяется;
- любой целочисленный план удовлетворяется;

Решается задача с дополнительно введенным ограничением, процесс повторяется до получения целочисленного решения.

Недостатки метода

Идея отсечения приводит к трем проблемам:

- нахождение универсального правила формирования отсечений;

- доказательство конечности процесса отсечений;
- борьба с чрезвычайным «разрастанием» размерности задач при добавлении ограничений;

Методы отсечения не нашли широкого применения при решении прикладных задач по следующим причинам:

- определение того, какое отсечение есть сильнейшее, есть сложная в вычислительном отношении задача;
- методы отсечения приспособлены в основном для решения целочисленных задач;
- методы отсечения не приспособлены для решения задач со слабо заполненной матрицей;

Комбинаторные методы

Основная идея комбинаторных методов состоит в использовании конечности множества допустимых решений и замене полного их перебора сокращенным. Если каким-либо образом удастся показать, что подмножество $G' \subset G$ не может содержать оптимальных решений, то в дальнейшем задача решается на множестве $x \in G \setminus G'$. Таким образом, главную роль в сокращении перебора играют оценка и отбрасывание подмножеств, заведомо не содержащих оптимальных решений.

К комбинаторным методам относят методы:

- метод ветвей и границ;
- метод динамического программирования;
- аппроксимационно-комбинаторные методы и другие.

Комбинаторный подход сводится к целенаправленной взаимной перестановке групп работ в некоторой исходной последовательности, пока не будет получено оптимальное (приближенно оптимальное) решение.

Основопологающей работой по этой теме является работа С. Джонсона, положившая начало исследованиям в области конвейерных систем. В ней, а также в трудах Конвея Р.В. был предложен полиномиальный алгоритм минимизации длины расписания в конвейерной системе с двумя при-

борами, основанный на взаимной перестановке требований, и доказана его оптимальность. Этот алгоритм приведен в [30, 142], где также выведены неравенства, являющиеся достаточными условиями того, что одно требование предшествует другому. Е.Н. Хоботовым сделаны замечания по поводу транзитивности этих неравенств в случае, когда у некоторых требований длительность обслуживания первым прибором совпадает с длительностью обслуживания вторым прибором..

В [142] как один из наиболее значительных и интересных аналитических результатов теории расписаний отмечают следующий. Как уже упоминалось, при поиске оптимального по быстродействию расписания для m -стадийного конвейера достаточно рассмотреть $(n!)^{m-2}$ расписаний, согласно которым устанавливается одинаковый порядок работ для первых двух приборов и одинаковый порядок для последних двух приборов. Следовательно, для конвейера с числом стадий не более трех достаточно исследовать только множество перестановочных расписаний. Если же число стадий больше трех, то количество потенциально оптимальных расписаний резко возрастает. В этом случае методы, применимые к конвейерным системам, обычно используют специальные предположения и либо являются неэффективными с вычислительной точки зрения, либо дают только приближенное решение.

Приведенные результаты являются классической иллюстрацией использования методов комбинаторного анализа применительно к задаче построения оптимального расписания функционирования конвейерной системы. В работе [142] отмечается, что комбинаторные исследования направлены в основном и дают интересные результаты при рассмотрении вырожденных и частных случаев, а также показывает чрезвычайную широту их применения к конкретным задачам.

Метод ветвей и границ. Согласно этому методу предварительный шаг заключается в выборе начального приближения. В качестве такого приближения используется любое решение, удовлетворяющее существующим огра-

ничениям. Находим значение целевой функции. Далее на произвольной итерации выполняются следующие действия:

1 шаг. Проверяем список вспомогательных задач линейного программирования. Если список пуст, то необходимо прекратить вычисления: решение уже достигнуто. Если список не пуст, то выбрать задачу для решения и перейти ко второму шагу.

2 шаг. Решить исходную задачу без учета ограничений на целочисленность переменных. В этом случае имеем стандартную задачу линейного программирования, решение которой обычно не вызывает затруднений. Если задача не имеет допустимого решения или полученное значение целевой функции больше предыдущего, то зафиксировать его, принять в качестве последующего приближения и вернуться к первому шагу. В противном случае перейти к третьему шагу.

3 шаг. Если полученное решение удовлетворяет условиям целочисленности, то зафиксировать это решение и значение целевой функции ему соответствующее и перейти к первому шагу. Иначе, перейти к четвертому шагу.

4 шаг. Выбрать любую переменную для которой нарушается условие целочисленности и поместить в список вспомогательных задач линейного программирования еще две задачи, для которых выбранная переменная имеет значение ноль и единица. После чего вернуться к первому шагу.

В данном алгоритме имеется два момента, когда выбор дальнейшего хода решения делается произвольно: выбор вспомогательной задачи линейного программирования из списка и выбор переменной, по которой будут формироваться вспомогательные задачи линейного программирования, включаемые в список для дальнейшего решения. Вполне очевидно, что от этого выбора будет зависеть скорость сходимости рассматриваемой процедуры.

Недостатки метода

Несмотря на то, что алгоритмы ветвей и границ обычно более эффективны, нежели полный перебор, их требования в вычислительных ресурсах

растут как экспоненты или полиномы высокой степени от размера задачи и, поэтому возникающие на практике задачи точно фактически неразрешимы.

Динамическое программирование. Этот метод получил большое распространение при решении аддитивных задач математического программирования. Основу этого метода составляет принцип оптимальности Беллмана: оптимальная стратегия при любом первоначальном состоянии и любом первоначальном решении предполагает, что последующие решения должны быть оптимальными относительно состояния, полученного в результате предыдущего решения.

Методы математического программирования подразумевают создание и исследование моделей целочисленного и динамического программирования. Как правило, размерность возникающих при этом задач настолько велика, что получить точное решение за приемлемое время весьма затруднительно. Для нахождения приближенного решения в [44] предлагается отказываться от условия целочисленности переменных с последующим округлением полученного решения.

Многие задачи дискретной оптимизации сводятся к следующей постановке: определить вектор $x = \{x_i\}$ с дискретными компонентами, минимизирующий аддитивную функцию

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i)$$

при ограничении $f(x) \geq b$.

Широкий класс функций $f(x)$ допускает дихотомическое представление, такое что вычисление значений функции сводится к последовательному вычислению значений функций двух переменных. Так функция $f(x) = f_0[f_1(x_1, x_2), f_2(x_2, x_3)]$ допускает дихотомическое представление (рис.1.5.1). При этом соответствующие функции f_0, f_1, f_2 удобно представлять в матричном виде.

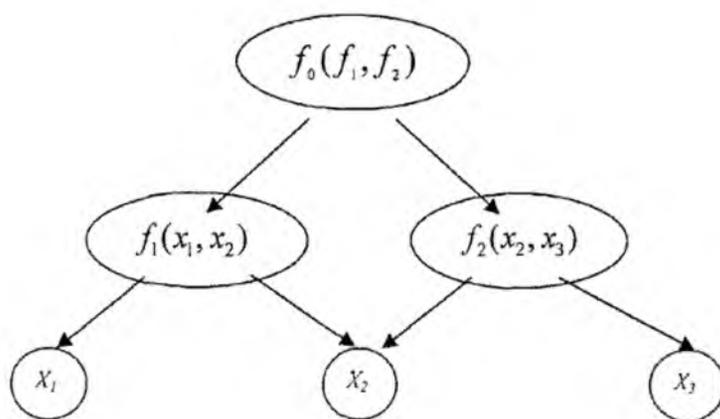


Рис.1.5.1

Данное представление широко используются в методах комплексного оценивания программ развития предприятий, регионов, результатов деятельности подразделений, уровня безопасности объектов и др. [15, 18, 78]

В [7, 74] доказаны теоремы о представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных. Так, например, непрерывная функция трех переменных представима в виде:

$$f(x_1, x_2, x_3) = h^1(x_1, \varphi_1(x_2, x_3)) + h^2(x_1, \varphi_2(x_2, x_3)) + h^3(x_1, \varphi_3(x_2, x_3)),$$

ее дихотомическое представление агрегированном виде на рис.1.5.2.

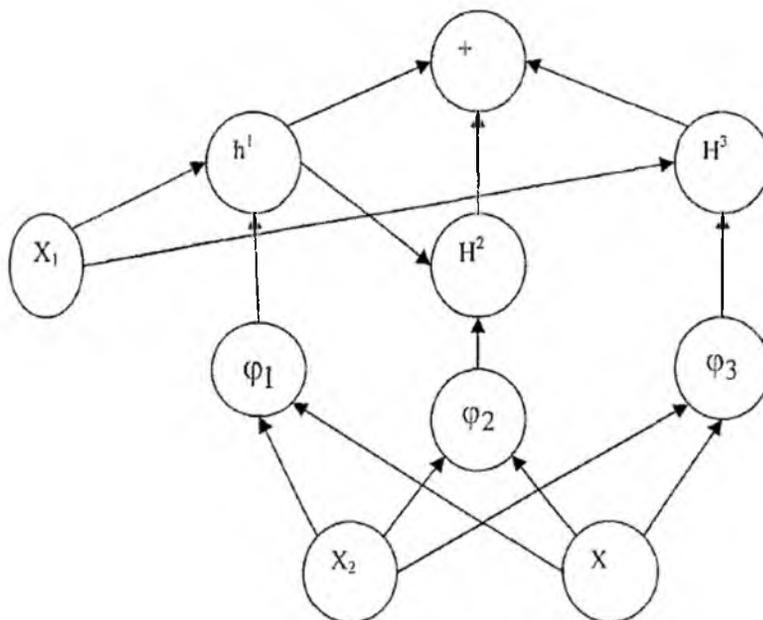


Рис. 1.5.2

Поскольку функция дискретных переменных может быть продолжена до непрерывной функции, то, тем более, любая функция дискретных пере-

менных представима в дихотомическом виде. В дихотомическом представлении можно представить и систему неравенств. Например, систему неравенств $f_i(x) \leq b_i, j = 1..m$ без ограничений общности можно принять, что b_i — положительные и одинаковые числа, $b_i = b > 0$. В этом случае систему неравенств можно заменить одним неравенством

$$f(x) \leq b, \text{ где } f(x) = \max f_i(x)$$

Очевидно, что функция $f(x)$ допускает дихотомическое представление, если все функции $f_i(x)$ допускают такое представление. [37,38]

В задачах комплексного оценивания [14, 78] функция $f(x)$, дающая интегральную оценку объекта, как правило, допускает дихотомическое представление в виде дерева. В этом случае можно предложить эффективный метод решения задачи

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i), \quad f(x) \geq b.$$

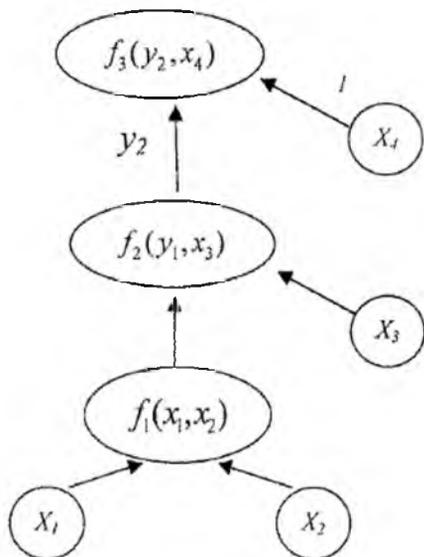
Например, для трех показателей построенная интегральная оценка имеет вид:

$$f(x_1, x_2, x_3) = \varphi_0(x_3, f_1(x_1, x_2)) = \varphi_0(y, x_3)$$

Заметим, что метод дихотомического программирования в случае, когда дихотомическое представление имеет вид дерева, является обобщением метода динамического программирования, расширяя круг задач, решаемых на основе данного подхода (рис. 1.5.3). [29]

Если в методе динамического программирования решением задачи является путь в некоторой специальным образом построенной сети, то в методе дихотомического программирования решением задачи является частичное дерево в некотором специально построенном дереве. Соответственно, принцип оптимальности в методе дихотомического программирования можно сформулировать следующим образом: любое поддерево оптимального дерева должно быть оптимальным.

Метод динамического программирования
(ветвь дерева)



Метод дихотомического программирования
(произ. Дерево)

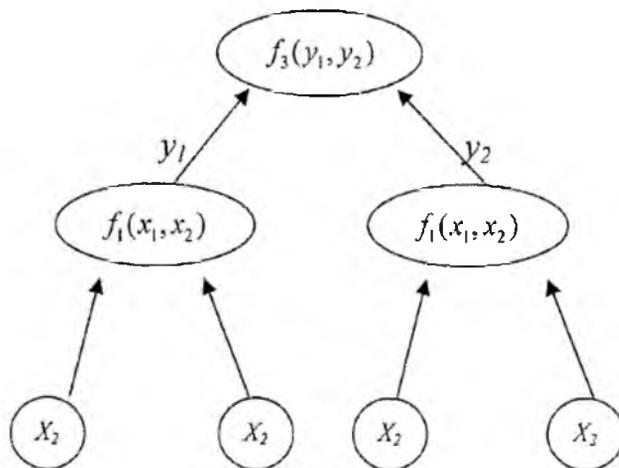


Рис. 1.5.3

Формально этот принцип оптимальности можно записать следующим образом:

$$\varphi_k(y) = \min_{(i,j) \in P(y)} [\varphi_i(y_i) + \varphi_j(y_j)],$$

где $P(y)$ - множество пар (i,j) , такие, что $y = f_k(y_i, y_j)$

Обобщением метода дихотомического программирования является метод сетевого программирования [29]. Обобщение состоит в том, что структура представления функций, описывающих ограничение задачи дискретной оптимизации, не обязательно должна быть дихотомической. Мы можем рассматривать любое сетевое представление ограничений, то есть представление в виде суперпозиции более простых функций. Главное, чтобы задачи в вершинах сетевого представления имели эффективные методы решения.

При этом, если структура сетевого представления является деревом, то мы получаем эффективный алгоритм решения задачи, последовательно решая задачи в вершинах сетевого представления.

В общем случае, путем разделения вершин, мы преобразуем сеть в дерево. Это делается следующим образом.

Рассмотрим произвольное сетевое представление функции $f(x)$, задаваемое сетью, выходом которой является вершина, соответствующая функции $f(x)$, а выходами – вершины, соответствующие переменным x_i , $i = \overline{1, n}$. Рассмотрим множество конечных вершин, которые не являются висячими, т.е. их степени захода больше 1. Разделим произвольным образом затраты $\varphi_i(x_i)$ на k_i частей, где k_i – число заходящих дуг. Фактически мы как бы разделили вершину i на k_i висячих вершин с соответствующей частью затрат. При этом каждый раз, когда встречается вершина со степенью захода больше 1, мы делим затраты на соответствующее число частей. В результате применения алгоритма мы получим оптимальное решение для модифицированной сети. Однако это решение может не быть решением исходной задачи. Тем не менее, имеет место следующая

Теорема. Полученное с помощью метода сетевого программирования решение дает нижнюю (верхнюю) оценку оптимального решения исходной задачи.

Имея метод получения нижних (верхних) оценок, можно применить метод ветвей и границ.

1.6. Выводы и постановка задач исследования

Анализ особенностей состояния мостовых сооружений позволил установить тенденции и определить проблемы, с которыми придется сталкиваться федеральной службе эксплуатации и управленческому аппарату отрасли.

Прежде всего следует отметить, что по существу в качестве интегральной оценки мостового сооружения может приниматься долговечность, то есть срок службы конкретного сооружения. Для достижения приемлемых для общества показателей долговечности из бюджетов различных уровней выделяются финансовые средства на содержание совокупности мостовых сооружений. Понятно, что существует связь между объемом выделяемых средств и показателями долговечности, которые могут быть достигнуты при этом уровне финансирования. Естественно, что необходимо установить эту связь и

осуществлять распределение средств таким образом, что бы обеспечить максимально возможное приращение уровня долговечности.

В то же время содержание моста начинается с приемки объекта и завершается принятием решения о его ремонте (закрытии на ремонт), то кроме определения оптимального варианта содержания мостовых сооружений возникает комплекс задач, связанных с планированием ремонтных работ таким образом, что бы понесенный ущерб от закрытия конкретного мостового сооружения был минимален.

Эти обстоятельства определяют необходимость разработки новых подходов к определению стратегии содержания мостовых сооружений и формирования плана ремонтных работ, что потребовало решения следующих основных задач:

1. Проанализировать состав парка мостовых сооружений и определить тенденции развития системы эксплуатации мостов.
2. Определить основные варианты содержания мостовых сооружений и затраты, соответствующие каждому варианту.
3. Разработать модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.
4. Определить множество Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.
5. Построить модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.
6. Разработать модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.
7. Получить нижнюю оценку решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.
8. Построить приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

II. СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.1. Основные принципы эксплуатации мостовых сооружений

В нашей государственной дорожной политике можно выделить четыре главных принципа в части мостовых сооружений [139]:

- подчинение всей работы в мостовом хозяйстве принципу экономической целесообразности;
- смещение акцента в финансировании в сторону эксплуатации, а не строительства;
- повышение долговечности мостовых конструкций, как вновь строящихся, так и эксплуатируемых (в Президентской программе "Дороги России" имелась подпрограмма "Повышение эксплуатационной надежности мостов");
- завершение создания эффективной государственной системы управления дорожным хозяйством страны, в том числе и управления мостами.

Модель системы управления эксплуатацией мостов была частью программы "Дороги России" и постепенно начала реализовываться в "Росавтодоре" с 1995г.

Упомянутые выше главные принципы технической политики безусловно отражают экономическую ситуацию в стране и являются "велением времени". Например, в Дании, где проблемы с мостами совсем другие, в число главных принципов входит "создание прекрасных дорог", предусматривающее решение экологических задач и подчинение дорог ландшафту, повышение социальной значимости дорог и мостов, обучение населения поддержанию дорог в идеальной чистоте [141]. Наши акценты

несколько иные.

Сегодняшняя ситуация с мостами требует уточнения главных принципов технической политики. Эти уточнения связаны с поиском максимальных выгод от наших действий и определением соответствующих - приоритетов. Так, анализируя финансовую потребность (табл. 2.1.1, построенная в расчете на 5000 мостов протяженностью 300000 м в ценах на 1997 г.) мостового сектора отрасли, можно сделать два основных вывода [146]:

а) увеличение долговечности мостов приводит к незначительному возрастанию средств на содержание (надзор, уход и профилактику) и в тоже время вызывает существенное сокращение числа мостов, требующих перестройки, реконструкции и ремонта; увеличение затрат на содержание на 300 млн. руб. дает высвобождение средств в размере более 5 млрд. рублей (см., например, рис. 2.1.1);

б) чем выше показатели долговечности, тем меньше общие годовые затраты на мостовой парк и ощутимее весомость затрат на содержание - от требуемых сегодня 19% до перспективных (для обеспечения срока службы 70 лет) 38% от общих затрат на мосты.

Таблица 2.1.1

Показатели долговечности - срок службы - работоспособность		35 лет 20 лет		50 лет 30 лет		70 лет 40 лет	
	ВОЗДЕЙСТВИЕ	ПОТРЕБНОСТЬ					
		% мостов	млрд. руб.	% мостов	млрд. руб.	% мостов	млрд. руб.
1	Замена моста из-за: - физич. износа - физич. и моральн. износа	3	2000	2,0	1000	1,5	600
		2		0,5			
2	Реконструкция (уширение с добавлением новых полос)	5	1125	2.5	565	565	337
3	Ремонт *) - без уширения - с уширением -	10	3000	5	1800	3	600
		15		10		2	
	Мелкий ремонт (ППР)	25	1125	10	450	7	315
5	Профилактика	30	300		425		638
	Надзор и уход	10					
Итого, потребность на 5000 мостов			7550		4240		2490
Наносимый ущерб			6000		2000		500

*) с учетом недоремонта

Эти два обстоятельства заставляют внести в концепцию уточнения,

расходы, \$ млн.

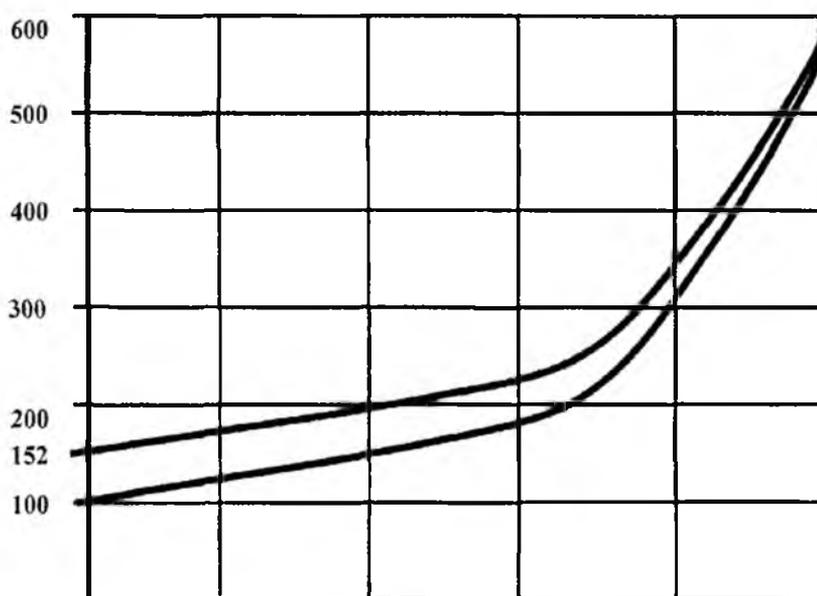


Рис. 2.1.1

связанные с первостепенной важностью работ по содержанию мостов и некоторым изменением акцентов.

Учитывая это концепция эксплуатации мостов может быть сформулирована следующим образом:

В целях рационального расходования средств и получения максимальных выгод для отрасли и народного хозяйства, главный замысел Дорожной Службы России в области эксплуатации мостовых сооружений заключается:

- а) в преимущественном финансировании работ по содержанию мостов;
- б) в постоянной работе всех структур службы в направлении повышения долговечности мостов за счет постепенного увеличения затрат на содержание (надзор, уход, профилактику и мелкий ремонт) и повышения качества строительства и ремонта;
- в) в управлении (регулировании) эксплуатацией мостов в общем и процессом повышения срока службы мостов в частности, как элементом Государственной Системы управления дорожным хозяйством страны.

Чтобы понять цели и задачи системы, следует сказать и об идеологии

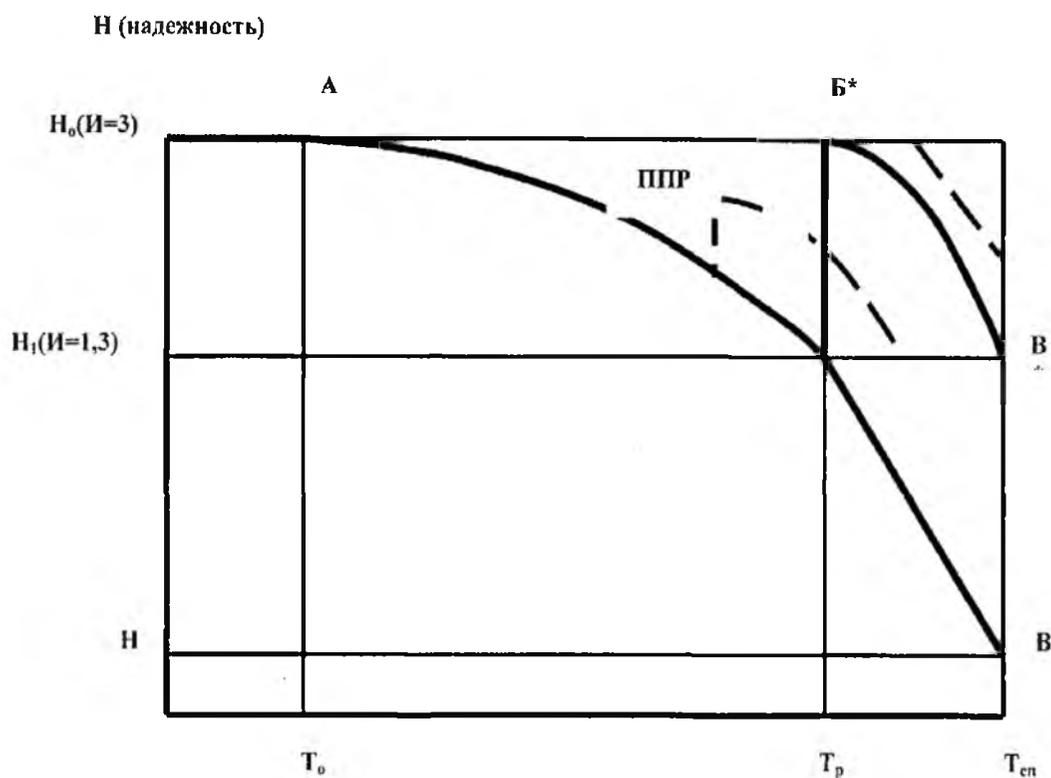
эксплуатации как системе взглядов и идей, позволяющей дать инструмент для реализации главного замысла (концепции) на каждом этапе жизни сооружения.

Мостовое сооружение за свою жизнь проходит три важнейших этапа эксплуатации.

Построенное сооружение эксплуатируется какое-то время без снижения надежности (рис. 2.1.2). За этот период протекают основные длительные деформации (усадка и ползучесть), возрастает прочность бетона, нормально функционирует система водоотвода и не нарушается изоляция у деформационных швов, водоотводных трубок, стоек ограждений и тротуаров. Вероятность безотказной работы сохраняется на уровне, обеспечиваемом СНиП 2.05.03-84 [140]. (например, для пролетных строений $P=0,9986$; индекс надежности равен 3,0). В указанный период за мостом осуществляется лишь уход. Продолжительность этого периода зависит от качества строительства и составляет к сожалению пока не так много, как правило от 5 до 10 лет.

Второй этап эксплуатации характеризуется появлением и развитием дефектов, изменением свойств бетона и коррозией арматуры. Появляются отказы в элементах, срок службы которых ниже, чем пролетных строений (покрытие, деформационные швы, системах водоотвода, изоляция).

Продолжительность второго этапа, например для пролетного строения, определяется временем, за которое вероятность безотказной работы пролетного строения снижается до 0,90, т.е. индекс надежности с 3,0 уменьшается до 1,3 [136]. За этот период за мостом ведется уход и периодические профилактические работы в рамках работ по содержанию. Продление указанного этапа, возможно при проведении планово-предупредительных работ (ППР). Снижение надежности на 1,7 индекса (точка Б на рис. 2.1.2) означает, что дальнейшая эксплуатация моста по первоначальной схеме невозможна, мост должен закрываться на ремонт или реконструкцию, поскольку работоспособность пролеты строений оказалась исчерпанной.



T_0 - период приработки

T_p – работоспособность; T_{cn} - предельный срок службы

Рис. 2.1.2

Если выполнение ремонта задерживается и по каким-то причинам должно быть перенесено на более поздний срок, дальнейшая временная эксплуатация моста возможна лишь при пересмотре условий нагружения сооружения, т.е. при введении ограничений по массе временной нагрузки сооружения, то есть при изменении условий движения.

Третий этап эксплуатации сооружения характеризуется двумя факторами:

- наличием в конструкциях, и в первую очередь в пролетных строениях и опорах, дефектов, снизивших их несущую способность и грузоподъемность моста в целом
- введенными ограничениями по массе транспортного средства, которое может безопасно двигаться по мосту в неконтролируемом режиме, и необходимым периодическим последующим снижением грузоподъемности.

Продолжительность третьего этапа (участок Б - В на рис. 2.1.2) определяется временем достижения такого состояния сооружения, когда при максимально

возможных ограничениях по временной нагрузке вероятность безотказной работы пролетных строений опять достигает 0,9.

Предельный срок, службы $T_{сл}$ установлен по повторному отказу и характеризует такое состояние, когда ремонтные мероприятия оказываются менее выгодными, чем замена моста.

Упомянутые три важных этапа функционирования сооружения также прослеживаются при оценке износа и элементов, из которых сооружение состоит (рис. 2.1.3, здесь k - показатель функции износа; T_0 - время эксплуатации без дефектов; T_1 - нормативное время достижения сроков проведения ГПР (доремонтный период эксплуатации); T_p - нормативное время достижения срока "ремонт" (работоспособность); $T_{сл}$ - нормативное время достижения срока "замена" (срок службы)). Износ начинается с момента T_0 и заканчивается предельным значением $U_{пред}$ в какой-то момент T . При этом допустимый уровень износа (работоспособность) достигается за время $T_{сл}-T_p$, являющимся II-м этапом эксплуатации. Эксплуатация за этой границей относится к III этапу.

Таким образом, в основу системы эксплуатации мостовых сооружений должны быть положены следующие принципы:

- с увеличением периода T_0 , что можно осуществить, повысив качество строительных работ (например, за счет организации постоянного контроля на всех уровнях и сопровождения работ) и обеспечив постоянный уход за сооружением с самого первого дня эксплуатации;
- с уменьшением темпа износа элементов (изменяется угол наклона линии А-Б на рис. 2.1.1), что можно осуществить, проводя организованный надзор за сооружением и своевременное выполнение профилактических работ;
- с выполнением планово предупредительных работ ранее, чем будет исчерпана работоспособность (на рис. 2.1.1 - пунктирная линия), что можно эффективно осуществить только при условии организованного надзора и планирования.

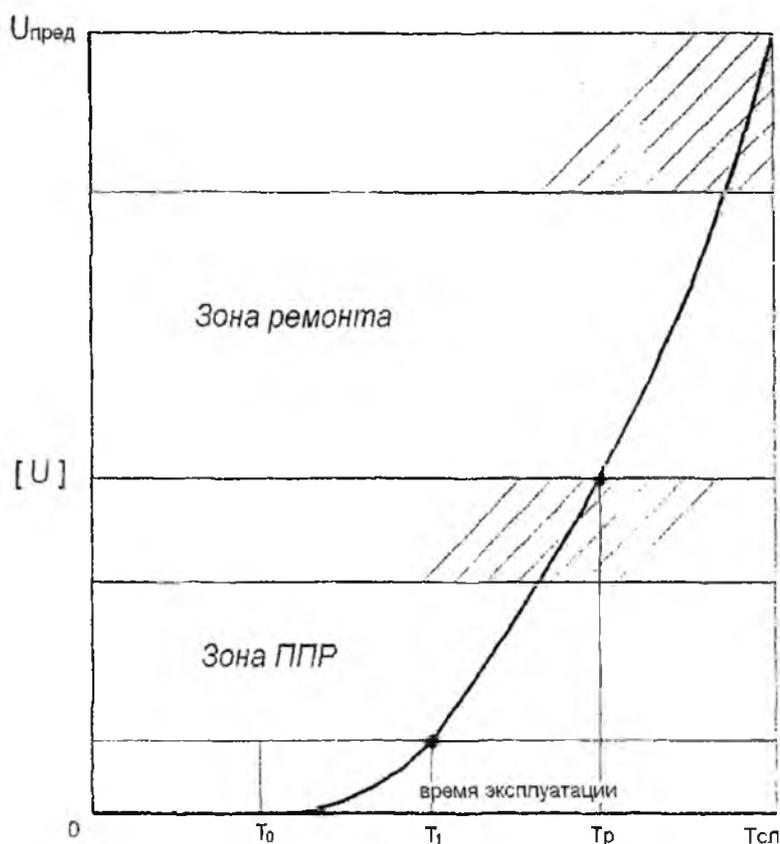


Рис. 2.1.3

Установлено, что только за счет мероприятий, осуществляемых при содержании, можно увеличить работоспособность сооружения с 20-25 лет (сегодняшний уровень) до 40-70 лет в зависимости от вкладываемых средств. Как следствие, можно увеличить предельный срок службы до 70-100 лет, а при соответствующей политике ремонта - более 100 лет. При выполнении всех требований по содержанию и обеспечению нормального качества строительства вполне возможно, что за весь срок службы моста не потребуется вложений больших средств в ремонт, а будет осуществляться менее капиталоемкое вложение в надзор, уход, профилактику и мелкий ремонт (ППР).

Если говорить об идеологии в области эксплуатации в целом, то следовало бы добавить несколько слов о взглядах на процесс эксплуатации моста после ремонта. Этот период характеризуется повышенным темпом износа элементов и сооружения в целом и необходимостью регулирования условий движения транспортных средств. То есть, как и на начальных

этапах на первое место выходит необходимость постоянного надзора. Планируемый в перспективе срок службы моста после ремонта (до $T_{ср} \sim 70$ лет) может быть достигнут, если повысить качество ремонтных работ, в том числе и проектов, и поддерживать сооружение в работоспособном состоянии после ремонта. Ресурс может быть продлен еще больше, если будут применены при ремонте более долговечные материалы или более надежные технические решения, по сравнению с традиционными (на рис. 2.1.1-линия Б-В).

2.2. Классификация работ по содержанию мостовых сооружений

Приведенная "идеология" в области эксплуатации позволила обосновать принятую сегодня классификацию ремонтно-восстановительных работ на мостовых сооружениях (рис. 2.2.1) [141]. В этой классификации основное место занимают работы на самом главном периоде жизни сооружения - работы по содержанию, предусматривающие постоянные надзор и уход, периодическую профилактику и эпизодические планово-предупредительные работы, приводимые в процессе функционирования сооружения от постройки до ремонта. В связи с этим главной задачей службы эксплуатации мостовых сооружений является обеспечение своевременной реализации всех работ по содержанию, которые смогут существенно продлить срок службы сооружения.

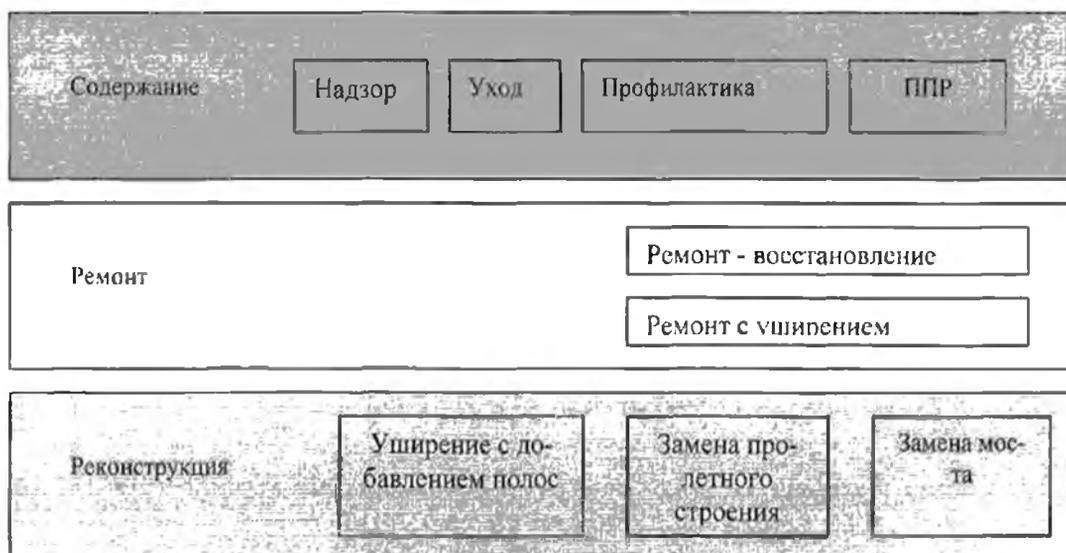


Рис. 2.2.1

Теоретической основой содержания мостовых сооружений является сохранение надежности и повышение долговечности конструкций за счет своевременного выполнения в необходимом (научно-обоснованном) объеме комплекса мероприятий на различных этапах функционирования сооружения. К таким «мероприятиям» относятся 120 видов конкретных работ [141], объединенных в три группы:

- уход - нормативные, постоянно выполняемые работы (33 вида работ) с целью сохранения первоначального состояния и исключения появления дефектов и повреждений в раннем возрасте;
- профилактика - сверхнормативные работы (55 видов работ), выполняемые с интервалом 2-5 лет с целью снижения темпов начавшихся деградационных процессов в материалах и элементах;
- планово-предупредительные работы (ППР) - специальные работы (32 вида работ), выполняемые с целью предупреждения нарушения (раннего истощения) работоспособности элементов и конструкций за счет устранения накопившегося в них износа, размер которого еще не превысил допустимого уровня.

Наиболее важными работами по уходу являются:

- очистка элементов проезжей части и несущих конструкций мостовых

сооружений и тоннелей, а также лотков и труб от грязи, льда, снега, льда, расчистка русел от насосов, скалывание льда у опор и ледорезов, натирка катков графитом, смазка пружин и механизмов деформационных швов, подтягивание болтов и тяжей при их ослаблении, заделка трещин в покрытии;

- пропуск ледохода;
- обслуживание паромных переправ - регулирование высоты причалов, загрузка, перемещение и разгрузка паромов, уход за механизмами и конструкциями паромных переправ, устройство и обслуживание ледяных переправ;
- обслуживание наплавных и разводных мостов - сборка и разборка сезонных мостов, разводка и наводка мостов, уход за подъемными и разводными механизмами, а также наплавными средствами и надстройками;
- организация безопасного и бесперебойного движения по мотам и под ними, а также через тоннели.

Все работы по уходу за искусственными сооружениями проводят постоянно в течение года на основании результатов текущих и периодических осмотров, а также постоянного надзора. Работы выполняют по месячным графикам комплексно на всем сооружении, устраняя мелкие неисправности во всех его частях. Одновременно проводят соответствующие работы по поддержанию сооружения в чистоте и порядке.

Производственные организации, эксплуатирующие мосты на судоходных реках, должны устанавливать на них, а также содержать навигационные знаки и огни в соответствии с Правилами плавания по внутренним водным путям России.

Профилактические работы направлены на поддержание сооружений в исправном и работоспособном состоянии. При профилактике устраняются небольшие по объему дефекты и повреждения на стадии, когда они не являются опасными для сооружения (грузоподъемности, безопасности движения

и долговечности). Все работы, отнесенные к профилактике, выполняются в течение всего срока службы сооружения с периодичностью 2-5 лет.

К ним относятся:

- на конструкции мостового полотна --- исправление отдельных секций или элементов перил и ограждающих устройств, тротуаров, съемных элементов деформационных швов, замена мастики в швах, ямочный ремонт покрытия, восстановление слоев одежды вдоль деформационных швов и на тротуарах, исправление водоотводных трубок, устранение просадок в местах сопряжения моста с насыпью путем добавления грунта или асфальтобетона, устранение повреждений отдельных элементов балочной клетки;
- на металлических конструкциях - зачистка, шпатлевка и окраска отдельных участков и элементов, замена отдельных ослабленных заклепок, усиление одиночных клепаных ветвей элементов накладками, сверление отверстий на толщину элемента по концам трещины длиной 1 см. в швах и с края листа металла путем срубки металла и зачистки этих мест;
- на бетонных, железобетонных и каменных конструкциях - устранение раковин и одиночных трещин в материале, приварка одиночных металлических накладок к закладным деталям в местах отсутствия накладок, локальное исправление (восстановление) защитного слоя или кладки, заделка швов в кладке;
- на деревянных конструкциях - очистка от продуктов гниения и усиление отдельных элементов, антисептирование и окраска отдельных элементов, установка подкладок и прокладок, заделка зазоров и щелей, устройство водо-защитных козырьков, замена обшивки свайных опор и ледорезов, борьба с пучением грунта около свай, замена отдельных досок настила, тротуара, колесоотбойного бруса, отдельных поперечин и деталей заборных стенок, одиночных простых прогонов, связей;
- на опорных частях - подтяжка болтов, окраска, устройство защитных коробов, исправление положения катков, замена съемных отдельных деталей без подъёмки пролетных строений;

- на регуляционных сооружениях - устранение локальных мест размыва и повреждений насыпи или укреплений;
- на водопропускных трубах - заделка щелей и трещин, заполнение швов, выравнивание лотков, трубы и русла около трубы, устранение просадок под трубой и размыва откосов насыпи, локальное исправление укреплений насыпи;
- на наплавных мостах и паромных переправах - исправление локальных повреждений обшивки наплавных средств надстройки и соединений, исправление такелажа, окраска деталей и др.;
- в тоннелях - заделка трещин и сколов в обделке, оковка лещадок естественного свода и стен с закреплением породы, исправление лотков и крышек лотков, выравнивание лотков, устройство канав для отвода воды с поверхности над тоннелем, ямочный ремонт покрытия проезжей части на входе и непосредственно в тоннеле, мелкий ремонт системы вентиляции и освещения (при их наличии).

Планово-предупредительные работы (ППР) в зависимости от степени износа элементов осуществляют с периодичностью свыше 5 лет (~10:15 л) при износе элементов 10-30%, когда грузоподъемность сооружения практически не снижена. К ним относятся работы:

- на конструкции мостового полотна - сплошная замена покрытия с устройством соответствующих уклонов для стока воды, локальный ремонт гидроизоляции на полосах вдоль тротуаров на ширине 1-1,5 м, устройство водоотвода, замена поврежденных лотков и трубок для отвода воды с сооружения, устройство дренажа в зонах примыкания дорожной одежды к деформационным швам и тротуарам, восстановление зоны сопряжения моста с насыпью с перекладной (или без перекладки) переходных плит и восстановлением насыпи, замена (полная или частичная) деформационных швов на проезжей части и тротуарах, восстановление или замена (частично или по всей длине) блоков и плит тротуаров, ограждений безопасности, перил и др.
- на пролетных строениях - гидрофобизация или окраска всей поверхности

конструкций, восстановление отдельных узлов элементов пролетных строений при частичном их повреждении (проломы в плите, глубокие обширные сколы бетона с оголением арматуры в балках, диафрагмах, разрушение защитного слоя на части длины элемента), восстановление одиночных стыков и узлов с их усилением (путем развития сечения с применением железобетона, металла и т.д.) При этом на деревянных конструкциях в ППР входит усиление или частичная замена элементов проезжей части, прогонов и тротуаров, сплошное антисептирование методом пропитки элементов конструкций, подтяжка тяжей в узлах ферм и др.

- на опорных частях - замена опорных частей или их выправка с подъемкой пролетных строений.
- на опорах - замена подферменников, отдельных блоков кладки, восстановление или усиление отдельных узлов конструкции опор, восстановление защитного покрытия (торкретирование), усиление элементов стоечных опор, обустройство опор для их ремонта и осмотра.
- на регуляционных сооружениях и подходах - локальное восстановление насыпи и укрепление конусов и регуляционных сооружений, усиление укрепления откосов насыпи и берегоукрепительных сооружений, замена или устройство лотков и лестничных сходов на насыпи.

Важнейшей частью содержания, является надзор за сооружениями. В последние годы создана отраслевая система надзора, предусматривающая комплекс работ по учету, осмотрам, диагностике, обследованию, мониторингу за сооружениями.

От объемов и качества работ по надзору зависит своевременность выявления или прогнозирования наступления неблагоприятной обстановки на мостах, а следовательно и своевременность и объемы работ по содержанию. Указанные работы в первую очередь определяют период нормальной работы объекта (работоспособность) и срок их службы. Это отчетливо видно из графиков накопления повреждений в конструкциях при различных сценариях содержания (см. рис. 1.1.3). В частности:

- при отсутствии необходимых работ по содержанию, срок службы сооружения может в 1,5 ÷ 3,0 раза быть выше, чем при других сценариях;

- наиболее эффективным является сценарий с использованием ГППР и ремонта, причем при оптимизации планово- предупредительных работ их количество за время эксплуатации сооружения может составлять 2,3 и более.

Работы по содержанию мостовых сооружений планируются на основании непрерывного мониторинга мостов. Задачу обеспечения мониторинга состояния мостовых сооружений обеспечивается с помощью диагностики.

Диагностикой мостов, помимо обследований и испытаний, начали заниматься с 1991 года. Причиной введения нового вида надзора в 1991 г. явился непрекращающийся рост «недоремонта» мостов и невозможность объективной оценки текущего состояния сооружений, что не позволяет осуществить главное требование работ по содержанию: работы должны выполняться своевременно и в необходимом объеме. Периодичность работ по диагностике 5 лет решает на первом этапе задачи повышения достоверности текущей информации и снижает возможную ошибку при определении объемов планово-предупредительных (содержание) и ремонтных работ (см. табл. 2.2.1).

Таблица 2.2.1

Периодичность диагностики	15*	10	7	5*	3	1**
Ошибка в принятии решения об объеме работ по содержанию	25*	18	14	10*	5	1*

* - фактические данные

** - расчетные данные

Ошибка в оценке состояния моста, кроме того, существенно влияет на условия движения по нему, поскольку условия движения из-за физического износа элементов мостового полотна меняются ежегодно. Эта ошибка ухудшает показатели безопасности движения каждый год в геометрической прогрессии. И чем больше периодичность диагностики, тем к большим повреждениям приходят элементы мостового полотна к очередной диагностике. На-

пример, при диагностике один раз в 10 лет, а, следовательно, и отсутствии работ по профилактике и ППР в течение такого же периода, состояние покрытия на мосту переходит от «хорошего» к "аварийному", за 5 лет - от «хорошего» к «удовлетворительному». Такая же картина характерна для конструкций ограждений, перил и сопряжений. Именно поэтому наибольшая периодичность диагностики может быть принята равной 5 лет. При такой периодичности можно уже планировать затраты на ППР и ремонт.

За 14 лет из-за слишком «медленной» диагностики социальные потери на транспорте по федеральным мостам составили более 2-х миллиардов рублей. При пятилетней периодичности эти потери будут немногим более 0,5 млрд., а при периодичности 1-2 года будут практически не заметны. В ведущих странах мира периодичность обследования (не диагностики!) принята 2-3 года. При этом затраты на обследование находятся в интервале 0,5-1,0% от стоимости сооружения (в России затраты на диагностику составляют при 5 летней периодичности всего 0,2% , а на обследование при 15 летней периодичности до 0,4% от стоимости объекта).

Для того чтобы, начиная с 2006 г. можно было бы планировать работы по ремонту, исходя из результатов диагностики, в 2005 году выполнили работы по диагностике всех мостов, прошедших первичную диагностику до 1996 года.

С учетом выполненной диагностики в 2005 году потребность, в этих работах начиная с 2006 года представлена в табл. 2.2.2. При определении приведенных объемов исходили их необходимости:

А) - выхода на периодичность диагностики 5 лет (на 2006-2007 гг. еще остается несколько мостов с первичной диагностикой выполненной 7 лет назад);

Б)- проведения диагностики сложных конструкций, имеющих повышенную опасность усталостного разрушения или не ясную схему работы, 1 раз в 2-3 года.

Таблица 2.2.2

№	Наименование работ	Протяженность км/ стоимость млн.руб.				
		2005	2006	2007	2008	2009
1*	Повторная и первичная диагностика	70,0/35,0	70,0/35,0	70,0/35,0	60,0/30,0	60,0/30,0
2	Годы предыдущей диагностики	1993-1996	1997-2000	2001-2002	2003	2004
3	Диагностика после выполнения ППР и ремонта (коррект. Паспорта)	50/33,5	35,0/30,0	30,0/25,0	20,0/15,0	20,0/15,0
4	Сопровождение базы данных, млн.руб.	7,0	7,5	7,5	7,5	7,5
5	Итого по «диагностике», млн. руб., в ценах 2005г.	75,0	72,5	67,5	52,5	52,5
	Итого в ценах 2005г.	83,05	79,75	74,08	57,75	57,75

*) С учетом объектов, требующих диагностику через 3 года.

В представленной таблице помимо «плановой» диагностики предусмотрено традиционное сопровождение и корректировка базы данных (БДМ), а также работы по диагностике после ремонта и ППР. Потребность в диагностике после ремонта с корректировкой Паспортов и базы данных на сегодня составляет примерно 700 сооружений (мосты с ППР и отремонтированные в течение 2004 и 2005 гг.) протяженностью около 45 км. Из них задолженность по 2004 и 2003 гг.- 250 сооружений (протяженность ≈ 18 км.). С учетом этой задолженности, которая ликвидируется в течение 2005 и 2006 г., и определены работы, представленные в табл. 2.2.2.

2.3. Возможные стратегии по эксплуатации мостовых сооружений

Основной задачей службы эксплуатации мостов является не только получение и накопление информации о состоянии парка мостовых сооружений страны, но и дифференцированно распределять средства, то есть регулировать финансирование в зависимости от принятой стратегии эксплуатации. При правильном содержании объекта, то есть выполнении работ, относящихся в первую очередь к надзору, уходу, профилактике вообще может

не потребоваться ремонта. Это видно из сопоставления затрат при разных стратегиях эксплуатации [141]. На рис. 2.3.1 представлены схемы затрат при десяти стратегиях эксплуатации - от так называемой "нулевой стратегии" ("Do Nothing" - ничего не делаем, то есть не вкладываем средств в сооружение после его строительства) до стратегии с полным использованием всей номенклатуры работ.

Анализ затрат (табл. 2.3.1) по различным стратегиям эксплуатации мостового сооружения с железобетонными пролетными строениями (применительно к средней полосе ЕЧ РФ) показывает, что от объема и вида затрат можно прийти к различным показателям работоспособности и срока службы. Например, уменьшение интервалов между профилактическими работами отодвигает срок выполнения ремонтных работ (увеличивается работоспособность) и увеличивает соответственно общий срок службы. Так же увеличивает работоспособность и своевременное выполнение ППР, затраты на что выше затрат на уход и профилактику, но значительно ниже затрат на ремонт. Наибольший срок службы при наименьших затратах дают стратегии эксплуатации №8 ($T_{сл}=70$ лет; $C_A=0,0348$ и $C_B=0,0017$) и №10 ($T_{сл}=95$ лет; $C_A=0,0358$ и $C_B=0,0015$), которые не предусматривают работ по ремонту.

Но чтобы прийти к такой схеме эксплуатации (без ремонта) нужно постоянно отслеживать состояние сооружения, поскольку эффект от реализации предложенной модели лежит в "своевременности" и "достаточности" мероприятий. И в этом суть регулирования процесса содержания мостовых сооружений.

Для более объективного определения оптимального времени проведения тех или иных мероприятий, то есть обеспечения "своевременности", предложен новый подход к оценке состояния конструкций по показателю

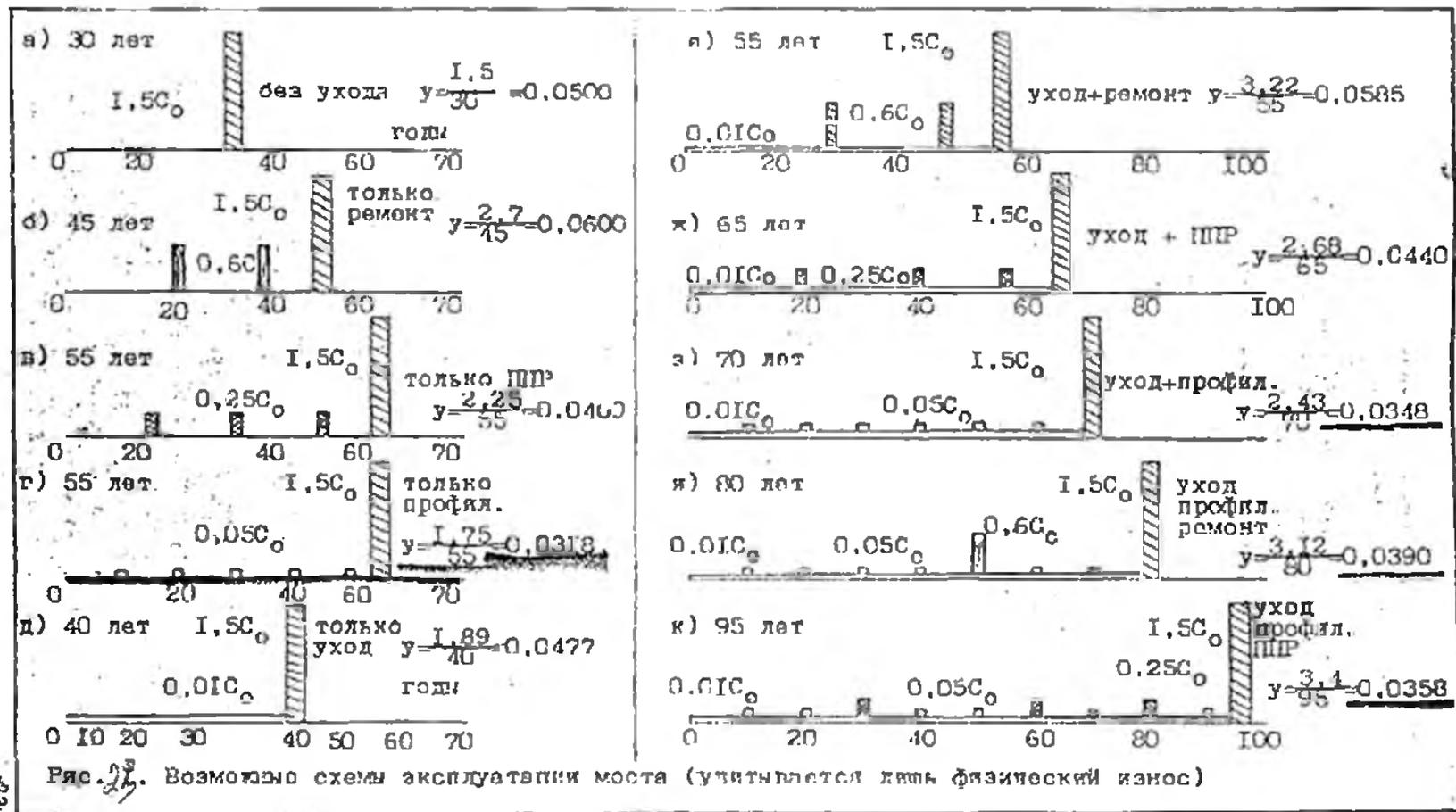


Рис. 2.3.1

Таблица 2.3.1

Стратегия эксплуатация			Достижае- мый срок службы до замены Тщ, годы	Показатели затрат"			
№	Воздействие	Годы воздейств.		А., Сум- марные за период Т ₀ ,	Б.^Пр и- веден- ные за период	Удельные	
			С _к = А/Т _к			С _{БТ} Б/Т _к	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Без ухода ³⁾	-	30	1,5хС ₀	0,1000	0,0500	0,0330
2	Только ремонт						
	- ремонты	20,35	45	2,7хС ₀	0,1150	0,0600	0,0038
	- замена	45					
3	Только ППР						
	-ППР	15.30,45	55	2,25хС ₀	0,1000	0,0409	0,0018
	-замена	55					
4	Только про- филактика						
	- проф.	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45,	55	1,75хС ₀	0,1200	0,0318	0,0022
	- замена	55					
5	Только уход	ежегодно	40	1,89хС ₀	0,1000	0,0477	0,0025
6	Уход + Ремонт						
	-уход	ежегодно	55	3,22хС ₀	0,1620	0,0585	0,0029
	- ремонт	30, 45					
	- замена						
7	Уход + ППР						
	-уход	ежегодно	65	2,68хС ₀	0,1600	0,0440	0,0025
	-ППР	20. 40, 55					
	- замена	65					
8	Уход + про- филакт.						
	-уход	ежегодно	70	2,43хС ₀	0,1200	0,0348	0,0017
	- профилактика	10, 20, 30. 40					
	- замена	70					
9	Уход+проф.+р емонт						
	-уход	ежегодно	80	3,12хС ₀	0,1400	0,0390	0,0018
	- профилактика	10, 20, 30, 40, 60, 70					
	- ремонт	50					
	- замена	80					
10	Уход+профил. + ППР						
	-уход	ежегодно	95	3,40хС ₀	0,1400	0,0358	0,0015
	- профилактика	10, 20, 40, 50, 70, 90.					
	-ППР	30, 60, 80					
	- замена	95					

Примечания:
1 - в долях от стоимости строительства объекта С₀ с существующими параметрами по НУКВ, например [56]
2 - с учётом нормы дисконтирования 0,12.
3 - выполняются обычные работы по содержанию дорог в минимальном объеме.

износа. От показателя износа каждого элемента сооружения как доли исчерпания ими своих функциональных качеств можно перейти к показателю износа всего сооружения [151].

Постепенный переход на показатель физического износа взамен существующих общих оценок (от "неудовлетворительно" до "хорошо") и оценок отдельных параметров ($K_{\text{н}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{г}}$), которые выводят на степень повреждения (категории повреждений I, II и III по ВСН 4-81/90) и в дальнейшем к принятию решения, позволит решение о восстановительных мероприятиях принимать сразу по показателю износа сооружения. При такой оценке технического состояния сооружений становится возможным их сопоставление, не смотря на имеющиеся в конструкциях отличия и различные функции отдельных элементов (табл. 2.3.2).

Основой для определения износа сооружения в целом являются показатели износа каждого из его элементов т.е. частные износы, которые отражают нарушения функциональных качеств элемента. Критерии оценки степени нарушения функций для каждого элемента различны. Для некоторых несущих элементов -например опор, частный износ выражается в снижении их несущей способности. Для пространственной системы, какой является пролетное строение, знание фактической несущей способности элемента (например, балки) недостаточно для оценки нарушения функций (или работоспособности) пролетного строения в целом. Поскольку функцией несущих конструкций является обеспечение безопасного пропуска транспортных средств по мосту (пролету), то критерием оценки степени нарушения функции для пролетных строений должно быть изменение грузоподъемности, учитывающее перераспределение нагрузок между элементами из-за различных дефектов и изменения несущей способности.

Критерием нарушения функций для ряда элементов является потеря прочности на определенной площади распространения. К ним относятся покрытие, тротуары и укрепления, функции которых -обеспечить безопасный пропуск автомобилей, пешеходов и водного потока. Так например, для покрытия 100%-ный износ соответствует состоянию, при котором его функции полностью исчерпаны и проезд по мосту невозможен, в частности:

- покрытие разрушилось по всей площади;
- имеются неровности глубиной (высотой) свыше 10 см на большей части площади.

Таблица 2.3.2

№	Характеристика условий движения	Износ, %	Повреждение (состояние)
1	2	3	4
1	Комфортность $U < 20\%$	10	Одиночные (с шагом не чаще 5м) поперечные трещины. Трещины в покрытии над деформационными швами или в зоне деформационных швов (раскрытие до 3 мм).
		20	Одиночные неровности глубиной (высотой) до 1 см - просвет под 3-х метровой рейкой. Волны на части длины (не более 20%) высотой до 1 см. Продольные и поперечные трещины раскрытием до 10 мм без образования бугров и выбоин.
4	Плавность $20 < I < 40\%$	30	Поперечные и продольные трещины с разрушением асфальтобетона по кромкам и частичным выносом оторванных кусков; сетка трещин до 50% площади покрытия. Одиночные выбоины на толщину одного слоя. Неровности (бугры или ямы) глубиной или высотой до 30 мм, образованные деформационными швами.
		40	Повсеместные трещины с раскрытием свыше 10мм отрывом кусков асфальта. Колейность покрытия, наплывы у бордюра (тротуара) на длине до 50% моста высотой до 5 см. Неровности (бугры) или ямы), образованные деформационными швами или рядом со швами, высотой до 50 мм.
5		50	Частое выпучивание асфальтобетона, неровности глубиной до 50 мм на площади свыше 50%, колейность с наплывами вдоль бордюра (на части длины) свыше 5 см.
			Отдельные (одиночные свыше 0,5м~) выбоины до защитного слоя
6		60	Сплошные неровности на площади свыше 50% высотой до 50 мм. Колейность с наплывами свыше 10 см длине 50%.
			Повторяющиеся (но не чаще чем 5 м) крупные по площади (до 1 м ²) выбоины с повреждением защитного слоя и обнажением арматуры.
7		70	Одиночные крупные по площади (до 1 м ²) выбоины повреждением защитного слоя или отдельные выбоины до 0,5 м ² с шагом менее 5м. Волны в зоне деформационных швов до 100 мм.
			Колейность и наплывы вдоль бордюра более 10 см длине не свыше 50%.
8	Безопасность $40 < I < 80\%$	80	Повторяющиеся (чаще чем через 5 м) крупные по площади (более 1 м ²) выбоины с повреждением защитного слоя и обнажением арматуры. Другие более обширные и серьезные разрушения.

Критерием потери функций покрытием являются вертикальные ускорения экипажа (пассажиров), которые не должны превышать 0,25g при оценке плавности и 1,0g при оценке безопасности требуется. При износе, превышающем предел плавности ($I=40\%$ табл. 2.3.2), необходимо вводить ограничения скорости движения транспортных средств и ограничение массы грузовых автомобилей. Выполняют планово-предупредительные работы, ямочный ремонт. При достижении предельного износа проезд любых транспортных средств по мосту должен быть закрыт. Требуется замена покрытия. Если покрытие отсутствует величина износа принимается 100%.

Подобные пояснения имеются для каждого элемента МС и для каждого их состояния.

Очень важным позитивным шагом, сделанным в последние годы была увязка между собой различных видов работ на сооружении и разработка классификации ремонтных работ на основе классификации дефектов. Классификация ремонтных воздействий позволила систематизировать наши усилия в планировании работ по следующим этапам:

- надзор (осмотры, диагностика, обследование);
- уход (нормативные работы по содержанию);
- профилактика (дополнительные работы по содержанию);
- ППР (специальные работы в рамках содержания);
- ремонт.

Указанное разделение на виды воздействий взаимосвязано с классификацией конструкций. Принято разделение мостового сооружения на конструктивные части, которые включают элементы, которые, в свою очередь, делятся на детали. Каждый элемент имеет свой срок службы, свои темпы деградации, свой доремонтный период. Различны и критерии деградации для каждого элемента (табл. 2.3.3.). В работе [137] при составлении перечня работ в каждом воздействии эти особенности учтены. Например, замена элементов относится к виду воздействия "ремонт моста", а ремонт (восстановление) элементов - к виду "ППР". Аналогичным образом работы, представляющие

Таблица 2.3.3

Конструктив- ная часть МС	Элемент	Деталь элемента	Критерий оценки состояния (износа)
МП	Покрытие	- примыкания - в. слой	условия движения (а, м/с ²)
	Гидроизоляция	- примыкания - средн. участок	площадь протечек
	Система водоотвода	- мост - подход	скорость отвода воды
	Сопряжение	- переходные плиты - одежда - опорные констр. под плитой	условия движения
	Тротуары	- плита - консоль	безопасность(свобода) движ. пешехолов
	Перила	- поручень - заполнение - стойка с узлом анкер.	несущая способность
	Ограждения	- осн. часть - анкеровка - сопряжения	энергоемкость
	Деф. швы	- окаймления - детали в уровне одежды	условия движения и герметичность
Пр. стр.	Фасад	- стенка - консоль	степень защиты арматуры
	Крайние балки	- опорные узлы - средние участки	несущая способность
	Средние балки	- опорные узлы - средние участки	несущая способность
	Плита	- опорные узлы - средние участки	несущая способность
	Связи		жесткость
Опоры	Ригель	- концевые участки - средние участки	нес. спос.
	Тело (стойки)		нес. спос.
	Фундамент	- фундам. плита - свайное основание	нес. спос. и размывы
Регул.	Конус	- берма - укрепление - отсыпка	площадь поврежд.
	Дамба	- берма - урпление - отсыпка	площадь поврежд.

* замену всего МП (средства ремонта);

* ремонт ж/б пролетного строения (средства ремонта);

* плано-предупредительные работы по металлическому пролетному строению и опорам(средства содержания).

собой восстановление деталей элементов, отнесены к профилактическим ра-

ботам.

Увязана с указанными классификациями и система надзора за мостом. Например, постоянные осмотры позволяют корректировать объем и сроки проведения профилактических работ, диагностика дает возможность определить объемы ППР и спрогнозировать время проведения ремонтных работ (через показатель износа), обследование позволяет определить объемы ремонтных работ, которые мы закладываем в свои планы.

Четкая взаимосвязь всех этапов эксплуатации моста возможна на основании трех важных выводов:

- время эксплуатации моста до ремонта (работоспособности) зависит строительства и уровня (качества) содержания;
- для продления срока службы сооружения наибольшее внимание следует уделять содержанию, от затрат на которое зависят затраты на ремонт;
- регулируя объемы работ по содержанию и ремонту в зависимости от состояния моста, можно обеспечить рациональное расходование средств Фонда, правильно составить бюджет и дать прогноз расходования средств.

До настоящего времени регулирование затрат на содержание и ремонт было невозможно, в том числе и из-за того, что эти работы не рассматривались совместно и не увязывались друг с другом.

Необходимость и практическая польза рассмотрения и ремонта может быть показана на примере анализа долговечности условного сооружения. Если воспользоваться информацией о долговечности основных конструктивных частей такого сооружения, которые имеют различные темпы снижения качества, можно показать, что в определенные годы на один и тот же объект должны выделяться одновременно средства и на ремонт, и на содержание. Например, в год, когда условному сооружению стало 25 лет, его можно включать в план ремонта, предусматривая замену мостового полотна, и одновременно выделять средства на ППР (мелкий ремонт

пролетных строений) и профилактику опор.

Можно так спланировать работы, что ремонт моста будет отодвинут на возраст 35 лет, когда потребуется уже восстановление железобетонного пролетного строения. Но для этого необходимо будет:

- в возрасте до 15 лет (например в 10 лет) – увеличит расходы на ППР для мелкого ремонта МП;
- в возрасте 20-25 лет - дополнительно выделить средства на ППР для ремонта элементов МП и элементов пролетных строений;
- в возрасте 35-40 лет - осуществить ремонт моста, в который включить:

То есть, время проведения ремонта и затраты на него зависят от уровня содержания (объемов средств и контроля качества) и степени владения вопросами прогноза состояния мостов.

2.4. Планирование работ по содержанию мостов

Учитывая результаты, полученные в п. 2.3. следует подчеркнуть, что в принятие решений о режимах содержания мостовых сооружений должно базироваться на прогнозе состояния элементов и прогнозе остаточного ресурса сооружений. Без данных о прогнозе невозможно представить, что ждет отрасль в будущем. Без наличия "прогноза", как и без знания "стоимостей", невозможно правильное принятие решения, то есть рациональное планирование затрат на ремонтно-восстановительные работы. И в большей степени это справедливо для объектов, по которым необходимо принять решение о их ремонте, реконструкции или перестройке, то есть где предстоят существенные, капиталоемкие вложения.

Последовательность действий для планирования работ и затрат схематически показана на рис. 2.4.1. В этой схеме следует обратить внимание на два этапа:

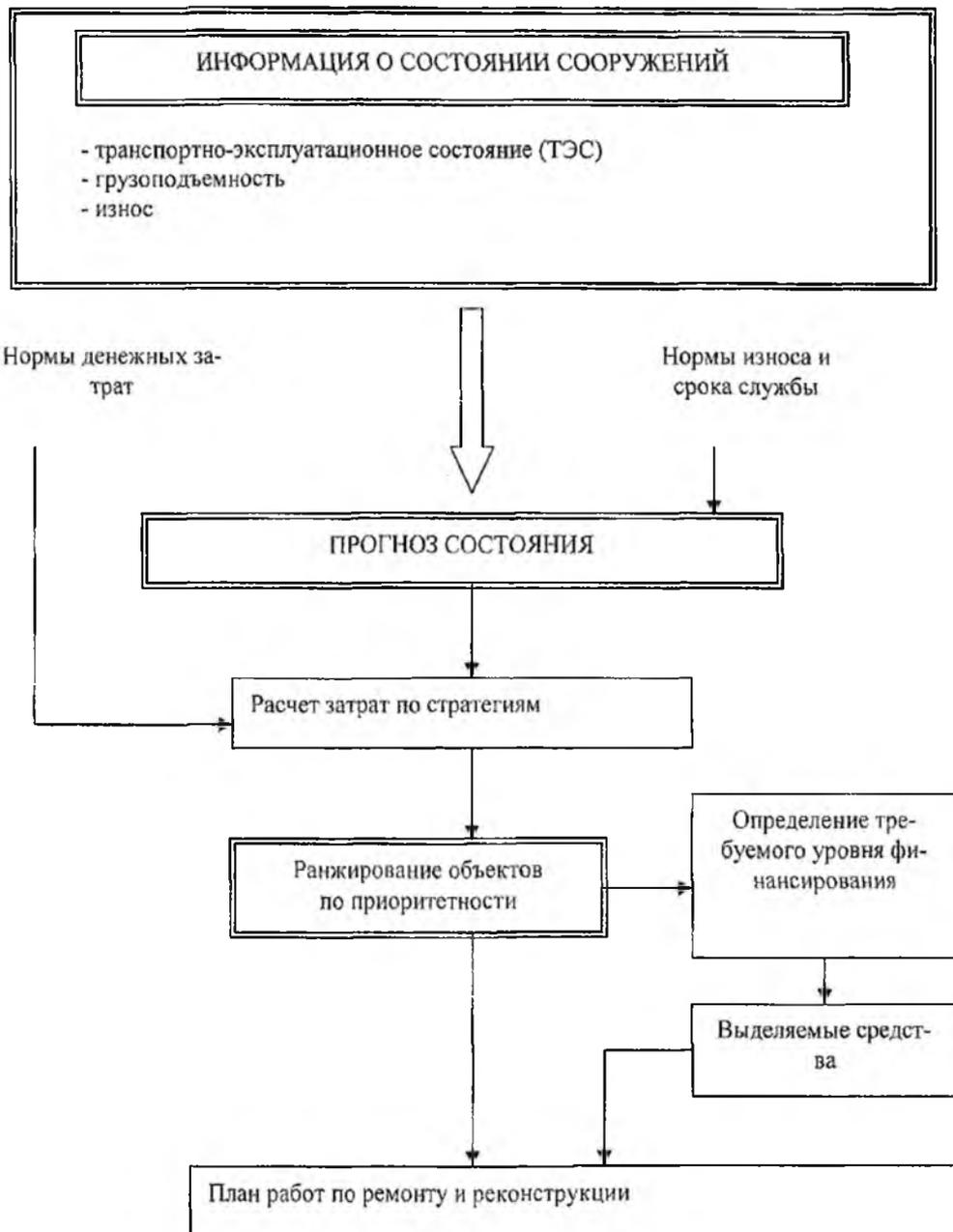


Рис. 2.4.1

- начальный этап, стоящий в начале цепочки действий - прогноз по существующим трем параметрам оценки состояния (определяют значения безопасной скорости, грузоподъемности, остаточного ресурса);
- финальный этап, стоящий в конце цепочки действий – ранжирование объектов по приоритетности, после которого формируется план.

Прогноз может быть выполнен двух видов:

- для определения средств на содержание и ремонт по группе мостов, что должно использоваться при решении вопросов о распределении бюджета между Дирекциями, регионами, районами - так называемый "сетевой подход";
- для определения технических решений и уточненных объемов работ и сроков их реализации на конкретных сооружениях - "локальный подход".

В первом случае прогноз осуществляют по изменению показателя износа на основании периодически получаемых данных от диагностики мостового сооружения. Дается прогноз изменения транспортно-эксплуатационных показателей, по которым прогнозируется изменение безопасной скорости - от расчетного значения V_p до предельно допустимого - $V_{пр\epsilon 4}$, при достижении которого движение по мосту должно быть закрыто. На основании исследований [59] были определены коэффициенты снижения расчетной скорости, позволяющие не только прогнозировать уровень безопасности движения по мостам, но и определять требуемые соответствующие дорожные знаки.

В качестве примера в табл. 2.4.1 приведены коэффициенты снижения расчетной скорости K_{pc} при различных показателях износа покрытия, системы водоотвода и деформационных швов.

Коэффициенты снижения расчетной скорости K_{pc} по мосту при различном износе покрытия, системы водоотвода и деф. швов.

Таблица 2.4.1

Износ, U%	Значения K_{pc}		
	покрытие	сист. водоотвода	деф. швы
0	>1,0	>1,0	>1,0
10	1,0	>1,0	>1,0
20	0,88	1,0	>1,0
40	0,57	0,75	0,9
60	0,35	0,55	0,65
80	0,20	0,40	0,45
100	0,10	0,25	0,30

По показателю износа осуществляют и сетевой прогноз срока службы сооружений, на основании которого определяют примерный объем затрат и

время выполнения ремонта, реконструкции или замены по каждому объекту региона (сети). Знание стоимостных показателей, а также закономерностей изменения состояния элементов и конструкций дают возможность установить и нормативные значения сроков службы, которые могут быть использованы при определении проектного срока службы или при технико-экономическом обосновании ремонта. В настоящее время такие нормативы подготовлены [118, 119].

Технико-экономическое обоснование ремонта и реконструкции является последним этапом в цепочке действий от сбора информации до составления плана на очередной год (см. рис. 2.4.1). Цель обоснования - расставить по ранжиру все объекты региона на основании показателя эффективности. Для этого управленцу предстоит решить следующие взаимосвязанные задачи:

- * Оценить транспортно-эксплуатационное состояние искусственных сооружений с учетом физического износа элементов;
- * Сформировать возможные стратегии восстановления каждого моста;
- * Определить объемы (стоимости) работ по каждому варианту стратегий;
- * Выбрать оптимальную стратегию восстановления моста;
- * Ранжировать мосты по экономической значимости (эффективности) их восстановления с целью установления приоритетности включения их в план.

В качестве критериев эффективности инвестиций используются четыре наиболее широко применяемых в общемировой экономической практике технико-экономических и финансовых расчетов показателя: чистый приведенный доход, внутренняя норма доходности и рентабельность

Чистый приведенный доход (net present, value NPV) характеризует сопоставительный результат инвестирования, его относительный эффект. Он представляет собой разность дисконтируемых затрат на один момент времени показателей дохода и капитальных вложений. При приведении

всех затрат к первому году сравнения вариантов чистый приведенный доход определяется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{D_t - I_t}{(1+i)^t}$$

где: D_t - доход, получаемый в результате восстановления моста в t -й год сравнения результатов; I_t - затраты на восстановление моста в t -й год сравнения вариантов; T - срок сравнения вариантов.

Внутренняя норма доходности (internal rate of return, ERR) характеризует ставку дисконтирования, при которой капитализация получаемого дохода за срок сравнения вариантов дает сумму, равную инвестициям. Таким образом, при этой ставке разница между дисконтируемыми величинами дохода и инвестиций равна нулю. Показатель внутренней нормы доходности при приведении

Затрат первому году сравнение вариантов определяется из формулы

$$\sum_{t=1}^T \frac{D_t - I_t}{(1+IRR)^t} = 0$$

Рентабельность характеризует собой соотношение чистого приведенного дохода и приведенных на этот же момент инвестиционных расходов ($NPV/COST$). Этот показатель является индексом доходности, поэтому он используется для ранжирования объектов по степени приоритетности включения их в план восстановления сооружений. Показатель рентабельности определяется по формуле:

$$NPV/COST = \frac{NPV}{\sum_{t=1}^T I_t (1+i)^t}$$

Отобранные по показателям чистого приведенного дохода и внутренней нормы доходности сооружения ранжируются по показателю рентабельности, начиная с наибольшего его значения. Формирование списка включенных в план мостов заканчивается тогда, когда накопленная сумма затрат на восстановления ранжированных объектов превышает объем ассигнований на эти цели.

В настоящее время в свете стоящих задач сформировался новый подход к системе надзора за мостовыми сооружениями. Безусловно, остаются постоянные осмотры в течение года и периодические осмотры после паводка или провоза сверхтяжелых транспортных средств. Но между этими, в общем регулярными, как и уход осмотрами и менее регулярными обследованиями вошел новый вид надзора - диагностика. Этот вид надзора увязан как с другими видами надзора, так и с нормативными (уход) или ненормативными (профилактика и ППР) видами воздействий на мостовое сооружение.

Под диагностикой понимают вид специального осмотра (обследования) с уменьшенным по сравнению с традиционным обследованием объемом работ. Целью диагностики является визуальная и инструментальная оценка изменения состояния видимых элементов с определением новых размеров повреждений и их влияния на несущую способность. Из-за того, что при диагностике не делают некоторые работы, которые фиксируют развитие длительных процессов (профиль дна, отметки конструкций, длины и размеры, установленные ранее и др.). Но за счет этого представляется возможным диагностику выполнять чаще, то есть в промежутках между обследованиями.

Диагностика позволяет определить эффективность мероприятий по профилактике и ППР, определить объемы работ по ненормативному содержанию, установить тенденции развития дефектов. Как уход за сооружением является важнейшей работой при содержании, так и диагностика является важнейшим элементом надзора.

Важность выполнения всех работ по уходу и надзору в процессе эксплуатации мостового сооружения, в том числе работ по контролю качества ремонта и содержания, подтверждается следующим примером из жизни построенного сооружения.

Допустим, построен мост с железобетонными пролетными строениями с балками, имеющими обычную арматуру, по схеме 3x15м на дороге III технической категории. В соответствии с нормами износа элементов мос-

та (например, для Южного региона) могут быть определены сроки основных видов воздействия на сооружения. В частности, неизбежными являются воздействия:

- ежегодные нормативные затраты по уходу ($-0,01 \times C_0$ - рис. 2.4.3, б);
- замена сооружения после исчерпания ресурса (в 1,3-1,4 раза затраты больше затрат на строительство, т.е. $0,3=1,4 \times 0,01$);
- выполнение ремонта на 32-34 год эксплуатации, когда уж потребуется восстановление гидроизоляции, фасадных поверхностей, крайних балок, ригелей опор, а также потребуется замена тротуаров, перил;
- планово-предупредительные работы до и после ремонта (18-20г. и 50-52г.), в течение которых восстанавливаются, главным образом, элементы мостового полотна (деформационные швы, покрытия, тротуары, система водоотвода...).

Сопоставление затрат на восстановление (рис. 2.4.3а) с затратами на надзор (2.4.3б, в) приведено на рис. 2.4.3.

В промежутках времени между ППР и ремонтом выполняются профилактические работы по мере повреждения элементов мостового сооружения и появления дополнительных дефектов, не устранимых при постоянном уходе (протечки, трещины, неровности в проезжей части...). Учитывая среднестатистические темпы накопления повреждений в элементах мостового сооружения, находится от 2 до 6 лет. На графике рис. 2.4.3, а эти воздействия показаны как маленькие столбики.

В соответствии с требуемыми периодичностью и затратами на содержание, включая уход ($-0,01 \times C_0$ с сопровождением), профилактику ($\sim 0,05 \times C_0$), ГШР ($\sim 0,25 \times C_0$), ремонт ($0,6 \times C_0$) и перестройку ($1,4 \times C_0$), определяются также и периодичность с затратами на работы по надзору. В частности, становятся неизбежными постоянные затраты на ежегодные нормативные осмотры ($0,03\%$ от C_0 , см. рис. 2.4.3 б), а также на обследования ($0,3-0,4\%$ от C_0) в периоды:

- после строительства (O_1 на рис. 2.4.3 б);
- перед ремонтом (предпроектное обследование, O_i);
- после последнего ППР, когда необходимо установить не только качество работ, но и остаточный ресурс до замены сооружения (O_3).

То есть за время эксплуатации сооружения требуется, по крайней мере, три детальных обследования. В промежутках между обследованиями проводятся специальные осмотры (обследования) по укороченной форме - диагностика, периодичность которой увязана с периодичностью профилактических работ.

Для обеспечения нормативного срока службы требуется, таким образом, выполнение в рассматриваемом примере различных работ с различной периодичностью и затратами:

- на ремонт и содержание (без затрат на перестройку)

$$\sum_{i=1}^{60} C_i = 1,98 \times C_0 \quad \text{или} \quad 0,033 \times C_0 \quad \text{в год}$$

- на осмотры, диагностику и обследования

$$\sum_{i=1}^{60} C_i = 0,0351 \times C_0 \quad \text{или} \quad 0,06\% \quad \text{от} \quad C_0 \quad \text{в год}$$

Как видно, средние за год затраты на надзор в объеме 0,06% от стоимости строительства и затраты на ремонт и содержание в объеме 3,3% обеспечивают нормативный срок службы сооружения.

Нарушение цепочки "надзор-эксплуатация" в периодичности и объеме приводят к увеличению затрат. Например, если из-за несвоевременности диагностики и профилактики ремонт сооружения вынуждены были выполнять на 20й, а не на 34й год эксплуатации, то последующие затраты на надзор, исходя из необходимости довести срок службы сооружения до 60 лет, увеличивается на 40н-45% (Рис. 27, в):

$$\sum_{i=1}^{40} C_i = 0,033 \times C_0 \quad \text{или} \quad 0,082\% \quad \text{от} \quad C_0 \quad \text{в год}$$

Затраты на содержание после ремонта и повторный ремонт составят

$$\sum_{i=1}^{40} C_i = 3,2 \times C_0 \quad \text{или} \quad 0,08 \times C_0 \quad \text{в год}$$

т.е. почти в 2,5 раза больше по сравнению с моделью своевременного проведения ремонтных мероприятий.

2.5. Планирование работ по содержанию на 2006 и последующие годы

В 2006 г. предполагается выйти на нормативный уровень содержания. При нормативном уровне объем финансирования по уходу определен для каждого органа Управления в зависимости от установленных областных коэффициентов, фактического количества сооружений, их длины и габарита, и является постоянным, если не изменяется площадь эксплуатируемых мостов.

Размер финансирования по профилактике установлен по заявкам органов Управления (с указанием конкретного перечня и объема работ), подтвержденным актами по комиссионному осмотру или результатам диагностики. Заявка может корректироваться один раз в год в зависимости от изменений в состоянии конструкций. Из-за недостаточного финансирования указанные работы практически не выполняются. Вынужденный «простой» в выполнении профилактических работ выливается в последующем в дорогостоящие ремонтные работы. Программой 2006 г. намечено изменение подобной ситуации.

Размер финансирования по ППР устанавливается по заявкам органов Управления и результатами диагностики. Объемы работ устанавливаются на очередной год и в течение года не корректируются. Из 32 возможных видов работ, приведенных в специальном перечне, ежегодно требуется выполнение 10-15 работ по каждому Управлению. Фактически же финансируется 60% работ от требуемого объема.

Нашей задачей в улучшении планирования работ по содержанию мостов является постепенный выход на финансирование «по потребности» работ по профилактике и ППР, а также увеличение расценок на нормативное содержание, что и предусмотрено программой 2006 г.

Объемы работ по содержанию определяются целевым показателем по обеспечиваемому сроку эксплуатации с сохранением работоспособного состояния, зависящего от предельного срока службы. Так при установленном целевом показателе $T_{сл} = 65$ лет и работоспособности 40 лет затраты на обеспечение должны быть не менее 1275 млн. руб. - в год (табл. 2.5.1).

Таким образом, бюджет по содержанию на 2006 г. должен включать цифру 1275 млн. руб., увеличение на величину дефлятора за 2 года, а также на сумму погашения невыполненного в 2004 - 2005 гг. объема ППР в размере 40% (210 млн. руб.) и профилактических работ в размере 100% (300 млн. руб.).

Таблица 2.5.1

№	Показатель	Уровень финансирования 2004 г млн. руб.	Требуемый объем финансирования, исходя из намеченного срока службы Тсл млн. руб.			
			50 лет	60 лет	65 лет	70 лет
1	2	3	4	5	6	7
1	Нормативное содержание (ежегодно)	410,5 (0,27% от С)	375 (0,25%)	450 (0,30%)	450 (0,3%)	600 (0,4%)
2	Профилактика	0	225 (0,15%)	300 (0,2%)	300 (0,2%)	300 (0,2%)
3	ППР	389,5 (0,26% от С)	300 (0,20%)	375 (0,25%)	525 (0,35%)	600 (0,4%)
	Σ	800 (0,53% от С)	900 (0,6%)	1125 (0,75%)	1275 (0,85%)	1500 (1,0%)

*) Примечание:

1. В бюджете предусматриваются средства по нормативному содержанию, не изменяемы по годам и не зависящие от состояния мостов.
2. Объемы работ по профилактике устанавливаются по актам осмотра.
3. Объемы работ по планово- предупредительным работам устанавливаются по ведомости повреждений и сметам.
4. С - базовая стоимость объекта (сметная стоимость)

Т.е. общие средства по содержанию должны составлять в 2006 году - $(1275+210+300) \times 1,2 = 2142$ млн. руб., если сохранять концептуальные положения о повышении показателей долговечности мостов на сети. Если погашение задолженности реализовать в течение двух лет (2006 и 2007 гг.), что предусматривается соответствующими решениями, то затраты на 2006 г. уменьшатся. С учетом этого планируемые затраты на содержание на 2006 -г

2007 гг. представлены в табл. 2.5.2.

Таблица 2.5.2

Годы	2006	2007	2008	2009	2010
Затраты млн. руб.	$(1275+300)1,2=1890$	$(1275+210)1,2=1782$	$12751,2=1530$	1530	1530

*) В ценах 2006 г. Прирост площади сооружений не учтен.

2.6. Модель определения вариантов содержания мостовых сооружений

В условиях дефицита свободных оборотных средств, по-прежнему характерного для большей части российской экономики, одной из первостепенных задач является проблема реализации стоящих задач с привлечением минимальных средств.

Применительно к задачам содержания и эксплуатации мостовых сооружений следует отметить, что возникает задача наиболее эффективного расходования финансовых средств, выделяемых эти цели. Понятно, что эффективность расходования отпущенных средств будет определяться уровнем долговечности, обслуживаемых на эти средства, мостовых сооружений. Выше было показано, что долговечность сооружения напрямую зависит от режима его содержания. Было показано, что при условии своевременного выделения средств возможно продление срока эксплуатации мостовых сооружений за счет проведения работ по его содержанию. Было выявлено десять возможных вариантов содержания мостовых сооружений, каждый из которых характеризуется различным уровнем затрат и, естественно, различными уровнями долговечности.

Таким образом, каждый мост характеризуется конкретным вариантом содержания, затратами, необходимыми на реализацию этого варианта и долговечностью сооружения, которая достигается при принятом варианте содержания. Соответствующие затраты для каждого из вариантов приведены в пп. 2.3 и 2.4.

Но в процессе планирования работ по содержанию мостовых сооружений, как правило, приходится иметь дело не с одним мостом, а целой группой

сооружений, в которой для каждого моста необходимо определить вариант его содержания при условии достижения максимальных значений по критерию долговечности.

В этом случае возникает несколько постановок оптимизационных задач.

Дадим их формальное описание. Для этой цели введем двоичную переменную x_{ij} , которая определяется следующим образом: $x_{ij} = 1$, в том случае, если для i -го мостового сооружения принят j -ый вариант содержания и ноль – в противном случае. Затраты на реализацию j -го варианта содержания на i -ом мосту обозначим через c_{ij} .

Для характеристики параметра долговечности введем индекс долговечности, определяемый как произведение долговечности на длину пролета мостового сооружения, то есть $T_{ij} = t_{ij}L_i$.

Тогда возможно сформулировать следующие задачи:

Задача 1. При заданном уровне затрат получить варианты содержания для каждого мостового сооружения обеспечивающие максимальное приращение интегрального значения индекса долговечности. Формальная постановка задачи может быть записана в следующем виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} &\leq R, \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (2.6.1)$$

Последнее ограничение в выражении (2.6.1) означает, что для каждого из мостовых сооружений должен быть принят какой – либо вариант содержания.

Задача 2. Определить варианты содержания для каждого моста, при котором достигалось бы нормативное значение индекса долговечности и при этом обеспечивалось бы минимальное значение затрат.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} &\rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} x_{ij} &\leq T, \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (2.6.1)$$

Здесь R – объем средств выделяемых на содержание мостовых сооружений; T – нормативное значение долговечности по группе мостовых сооружений; n – количество мостовых сооружений; m – количество вариантов содержания.

Задачи (2.6.1) и (2.6.2) относятся к классу задач комбинаторного программирования. Для их решения применимы метод ветвей и границ, метод динамического программирования, метод дихотомического программирования. Из всех приведенных методов, наиболее эффективен метод дихотомического программирования, теоретические основы которого разработаны в работах [Бурков].

Данный метод будет наиболее удобным еще и потому, что, проделав процедуру решения один раз, причем для любой из поставленных задач, мы в итоге получаем итоговую таблицу, которая содержит решения и первой и второй задач в постановке (2.6.1) – (2.6.2).

Рассмотрим применение алгоритма дихотомического программирования к задаче выбора оптимальной стратегии содержания группы мостовых сооружений на период их эксплуатации.

Пусть имеется четыре мостовых сооружения и три варианта их содержания (размерность задачи особого значения иметь не будет, так как от этого будет зависеть только объем вычислений, учитывая, что все вычисления будут проводиться вручную, ограничимся рассмотрением задачи небольшой размерности). Данные о затратах (числитель) и величине индекса долговечности (знаменатель), представлены в табл. 2.6.1.

Таблица 2.6.1

Вариант \ i	1	2	3	4
I вариант	$\frac{2}{200}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{4}{400}$	$\frac{10}{1000}$
II вариант	$\frac{3}{400}$	$\frac{3}{150}$	$\frac{8}{600}$	$\frac{15}{1500}$
III вариант	$\frac{4}{400}$	$\frac{5}{200}$	$\frac{13}{800}$	$\frac{17}{2000}$

Для решения поставленной задачи приведем дихотомическое представление предстоящего решения, представленное на рис. 2.6.1.

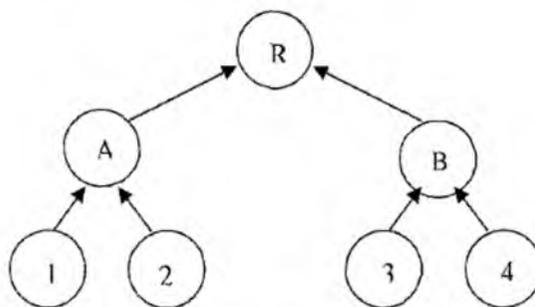


Рис. 2.6.1

Если рассмотреть один мост, то решение будет достаточно очевидным: имеющийся объем финансирования однозначно определит выбор варианта содержания объекта. В том случае, когда имеется два мостовых сооружения, то возможно уже несколько вариантов по их содержанию. Совокупность этих вариантов представлена на рис. 2.6.1 набором A и т. д. Составим таблицы возможных вариантов для набора A и B, которые и приведены в табл. 2.6.2. – 2.6.3.

Таблица 2.6.2

$\frac{5}{200}$	$\frac{7}{400}$	$\frac{8}{500}$	$\frac{9}{600}$
$\Rightarrow \frac{3}{150}$	$\frac{5}{350}$	$\frac{6}{450}$	$\frac{7}{550}$
$\frac{1}{100}$	$\frac{3}{300}$	$\frac{4}{400}$	$\frac{5}{500}$
2 / 1	$\frac{2}{200}$	$\frac{3}{300}$	$\frac{4}{400}$

↑

Таблица 2.6.3

$\frac{17}{2000}$	$\frac{21}{2400}$	$\frac{25}{2600}$	$\frac{30}{2800}$
$\Rightarrow \frac{15}{1500}$	$\frac{19}{1900}$	$\frac{23}{2100}$	$\frac{28}{2300}$
$\frac{10}{1000}$	$\frac{14}{1400}$	$\frac{18}{1600}$	$\frac{23}{1800}$
$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{400}$	$\frac{8}{600}$	$\frac{13}{800}$

↑

По результатам табл. 2.6.2 и 2.6.3, отбирая конкурентоспособные варианты, построим таблицы значений для наборов, определяемых на рис. 2.6.1 как *A* и *B*., которые и приведены в табл. 2.6.4 и 2.6.5. При составлении таблиц было учтено, что для каждого мостового сооружения должен быть выбран только один вариант содержания. Поэтому при составлении таблиц не рассматривался случай, когда на одном из мостов не ведутся работы, то есть затраты равны нулю, а по другому сооружению выполняются работы по улучшенному варианту.

Таблица 2.6.4

Затраты	5	7	8	9
Индекс долговечности	350	400	500	600

Таблица 2.6.5

Затраты	14	18	23	28	30
Индекс долговечности	1400	1600	1800	2300	2800

На основании табл. 2.6.4 и 2.6.5 составляем итоговую таблицу, содержащую данные для набора, обозначенного на рис. 2.6.1 через *R*, то есть итоговые данные, которые и представлены в табл. 2.6.6.

Таблица 2.6.6

$\frac{30}{2800}$	$\frac{35}{3150}$	$\frac{37}{3200}$	$\frac{38}{3300}$	$\frac{39}{3400}$
$\Rightarrow \frac{28}{2300}$	$\frac{33}{2650}$	$\frac{35}{2700}$	$\frac{36}{2800}$	$\frac{37}{2900}$
$\frac{23}{1800}$	$\frac{28}{2150}$	$\frac{30}{2200}$	$\frac{31}{2300}$	$\frac{32}{2400}$
$\frac{18}{1600}$	$\frac{23}{1950}$	$\frac{25}{2000}$	$\frac{26}{2100}$	$\frac{27}{2200}$
$\frac{14}{1400}$	$\frac{19}{1750}$	$\frac{21}{1800}$	$\frac{22}{1900}$	$\frac{23}{2000}$
$\begin{matrix} B \\ \diagdown \\ A \end{matrix}$	$\frac{5}{350}$	$\frac{7}{400}$	$\frac{8}{500}$	$\frac{9}{600}$

↑

Теперь, если стоит задача, при имеющемся объеме финансирования, определить оптимальную стратегию содержания рассматриваемых четырех мостов, то по табл. 2.6.6 находим в числителе таблицы значение, наиболее близкое к имеющемуся объему денежных средств. Найденному значению будет соответствовать максимально возможная, для заданного объема финансирования, величина индекса долговечности. По этой же таблице находим какие значения наборов A и B будет соответствовать найденному значению индекса долговечности. Зафиксировав их, переходим к табл. 2.6.2 (для набора A) и 2.6.3 (для набора B) по которым и находим какому варианту содержания будут соответствовать найденные значения.

Например, если предполагается поступление ресурса в объеме 33 единицы, то по табл. 2.6.6 находим, что это соответствует индексу долговечности равному 2650 (в таблице соответствующая клетка выделена цветом). Найденное значение соответствует значениям промежуточных сверток A и B равным $\frac{5}{350}$ и $\frac{28}{2300}$, соответственно (в таблице эти значения отмечены стрелками). Для значения промежуточной свертки A равному $\frac{5}{350}$ в табл. 2.6.2 находим соответствующее значение, которое выделено цветом. Этому значению промежуточной свертки A соответствует следующая стратегия для мостов 1 и 2: первое мостовое сооружение должно содержаться по первому ва-

рианту; второй – по второму. Аналогично находим стратегии для третьего и четвертого мостов, используя табл. 2.6.3. В этой таблице находим значение соответствующее значению свертки B , то есть $\frac{28}{2300}$ (соответствующая клетка таблицы выделена цветом). Этому значению соответствует вариант, согласно которому третий мост должен содержаться по третьему варианту, а четвертый – по второму.

Как уже упоминалось выше, мы фактически решили не одну задачу, а, как минимум две, то есть задачу 2 так же можно решать, используя приведенные табл. 2.6.2 – 2.6.5, только в этом случае в итоговой таблице ищется число, находящееся в знаменателе и наиболее близкое к заданному нормативному значению индекса долговечности.

Но этим еще не исчерпываются достоинства полученного решения. Рассмотрим задачу многокритериальной оптимизации, когда в качестве критериев оптимизации выступают два взаимно противоположных критерия: индекс долговечности и размер затрат. Пусть необходимо выбрать вариант содержания каждого мостового сооружения из условия, что индекс долговечности должен принимать максимальное значение, а размер затрат должен быть минимальным. То есть формальная постановка задачи имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} &\rightarrow \min, \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

Полученная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации, основным методом решения которых являются методы, связанные с получением интегральной оценки, а затем приведение исходной задачи к одной из стандартных задач математического программирования. Но получение комплексной оценки всегда сопряжено с большой степенью субъективности в построении редукции исходной задачи к задаче традиционного математиче-

ского программирования. Поэтому для лица принимающего решения предпочтительнее было бы получение некоторого, достаточно ограниченного, набора возможных, конкурентоспособных решений из которых затем и можно будет выбирать единственное решение, руководствуясь конкретной ситуацией. В данном случае речь идет о получении множества решений, оптимальных по Парето.

Рассматриваемая задача (2.6.3) позволяет получить множество Парето с помощью достаточно простого алгоритма.

Очевидно, что минимальные затраты будут соответствовать случаю, когда все объекты содержатся по самому дешевому варианту. Понятно, что этому варианту будет соответствовать и минимальное значение индекса долговечности, то есть мы получили «антиидеальную» точку с координатами $(c_{\max}; T_{\min})$. В том случае если допустить, что все рассматриваемые мостовые сооружения будут содержаться по самому дорогому варианту, то это будет соответствовать и максимальному абсолютному значению индекса долговечности, то есть в данном случае будет найдена точка с координатами $(c_{\max}; T_{\max})$ (при этом, что интересно относительные значения в этом случае будут как правило, достаточно низкие, так как срок службы сооружения значительно удлиняется). Это дает возможность найти координаты идеальной точки $(c_{\min}; T_{\max})$. В этом случае для нахождения множества Парето – оптимальных решений необходимо решить серию задач целочисленного программирования вида

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} &\leq R_k, \quad k \in [c_{\min}; c_{\max}] \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

Осуществляя дискретизацию интервала $[c_{\min}; c_{\max}]$ с приемлемой для исходной задачи точностью, получаем серию задач вида (2.6.4) решение каждой такой задачи дает одну точку множества Парето (см. рис. 2.6.2).

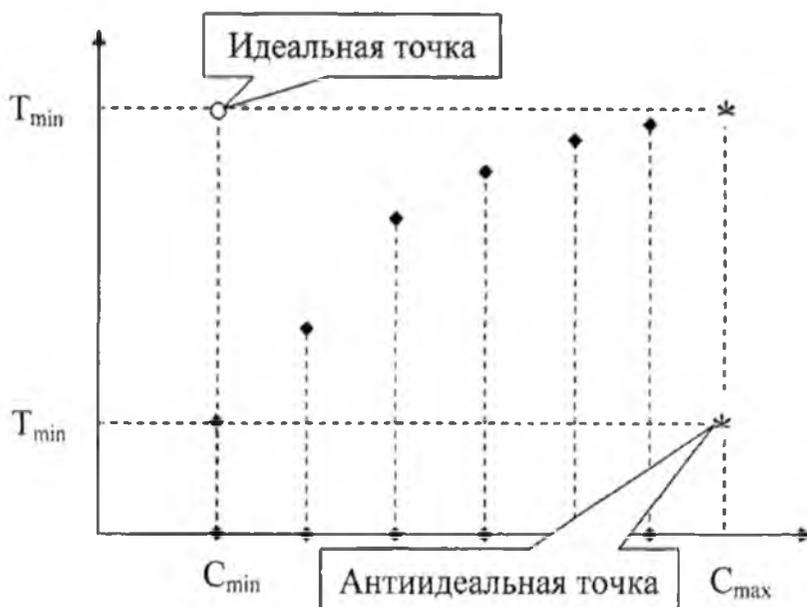


Рис. 2.6.2

Но можно получить решение и более простым способом, если воспользоваться методом дихотомического программирования.

В этом случае итоговая таблица решения будет содержать множества решений, по которым можно построить множество Парето – оптимальных решений. Результат такого построения представлен на рис. 2.6.3.

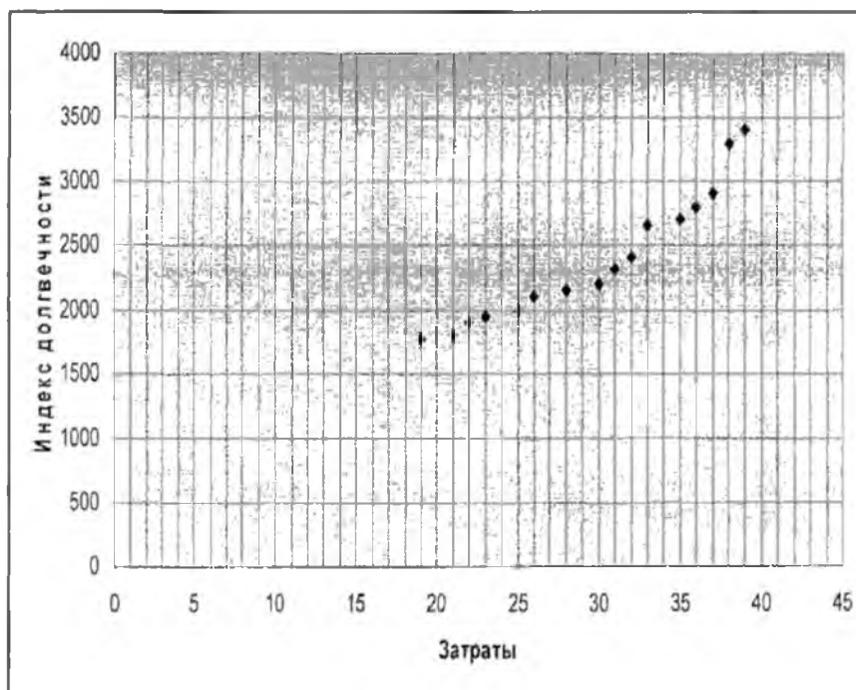


Рис. 2.6.3.

Имея ограниченное множество решений, лицо, принимающее решение,

ориентируясь на конкретную ситуацию, может принять обоснованное решение, выбрав из паретовского множества то, которое будет отвечать сложившимся внешним условиям.

Утверждение 2.6.1. Итоговая таблица метода дихотомического программирования содержит множество Парето-оптимальных решений исходной задачи.

Доказательством является методика построения итоговой таблицы, когда на предварительных этапах отсеиваются заведомо доминируемые стратегии поведения.

Но, все-таки, возникает вопрос о получении единственного решения. Это возможно на основе одного из принципов оптимальности при этом необходимо задаться значимостью каждого критерия. Как известно, значимость критерия определяется весовым коэффициентом, определяемым экспертным путем. Поэтому на этом этапе в решение задачи вносится существенный элемент субъективизма. Рассмотрим применение различных принципов оптимальности при условии равнозначности используемых критериев, то есть будем считать, что в рассматриваемых условиях параметры затрат и долговечности по значимости равны.

Для применения принципов оптимальности необходимо провести нормализацию критериев. Для этой цели используем полную нормализацию, то есть нормализацию будем проводить по формуле

$$\bar{y} = \frac{y - y^{\min}}{y^{\max} - y^{\min}}$$

При этом будем использовать экстремальные значения параметров, найденные по табл. 2.6.1. В этом случае имеет $T^{\min} = 17$, $T^{\max} = 39$, $C^{\min} = 1700$, $C^{\max} = 3400$.

Наиболее наглядным является принципы идеальной и «антиидеальной» точек. Идея этих принципов достаточно очевидна: находится наилучшая (наихудшая) точка, которая соответствует экстремальным значениям исследуемых критериев, в нашем случае это затраты и индекс долговечности, а затем вычисляются расстояние от каждой точки паретовского множества до идеальной

или «антиидеальной» точек. Оптимальным считается то решение, которое имеет минимальное (а в случае «антиидеальной точки максимальное) расстояние.

Нормализованные координаты идеальной точки в нашем случае будут (0; 1), а «антиидеальной» - (1; 0).

Исходные данные, нормализованные данные и расстояния до идеальной и антиидеальной точек приведены в табл. 2.6.7.

Решения, соответствующие оптимальным, выделены в табл. 2.6.7 другим цветом.

Решение, полученное по принципу идеальной точки, уже рассматривалось выше. А вот решение, полученное по принципу «антиидеальной» точки,

Таблица 2.6.7

Затраты	19	21	22	23	25	26	28	30
Долговечность	1750	1800	1900	1950	2000	2100	2150	2200
Нормализованные затраты	0,091	0,182	0,227	0,273	0,364	0,409	0,5	0,591
Нормализованная долговечность	0,029	0,059	0,118	0,147	0,176	0,235	0,265	0,294
Идеальная точка	0,975	0,959	0,911	0,895	0,9	0,867	0,889	0,921
Антиидеальная точка	0,91	0,82	0,782	0,742	0,66	0,636	0,566	0,504
Затраты	31	32	33	35	36	37	38	39
Долговечность	2300	2400	2650	2700	2800	2900	3300	3400
Нормализованные затраты	0,636	0,682	0,727	0,818	0,864	0,909	0,955	1
Нормализованная долговечность	0,353	0,412	0,559	0,588	0,647	0,706	0,941	1
Идеальная точка	0,908	0,9	0,851	0,916	0,933	0,955	0,956	1
Антиидеальная точка	0,507	0,52	0,622	0,616	0,661	0,712	0,942	1

достаточно тривиальное: оно показывает на точку, находящуюся в непосредственной близости от точки соответствующей максимальному значению затрат и, следовательно, максимальному индексу долговечности. Большой интерес вызывает вторая точка, которая соответствует минимальному объему фи-

нансирования и минимальному эффекту по отношению к долговременности эксплуатации мостовых сооружений. Это соответствует реализации первой стратегии содержания мостовых сооружений, доставляющая минимальное значение совокупным затратам и минимальное значение индексу долговечности эксплуатации рассматриваемой совокупности мостов.

Следует отметить, что при изменении значимости изучаемых критериев, то есть совокупных затрат и индекса долговечности, решения естественно будут другими.

III. РАЗРАБОТКА ПЛАНОВ РЕМОНТА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

3.1. Задачи оптимизации планов ремонта

Имеются n мостовых сооружений, требующих ремонта. Обозначим q_i – ущерб (ожидаемые потери) в случае, если мост i не будет включен в план ремонта планируемого периода, b_i – затраты на ремонт i -го моста, a_i – ущерб в случае, если мост i включен в план ремонта планируемого периода. Ущерб a_i возникает в силу того, что на время ремонта движение по мосту прекращается. Ущерб q_i включает потери, вызванные ограничениями на эксплуатацию моста, требующего ремонта, а также будущие потери, связанные с ремонтом моста. Как правило $q_i > a_i$. Введем переменные $x_i = 1$, если мост i включен в план ремонта и $x_i = 0$, в противном случае.

Задача 1. Определить $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$, минимизирующие

$$\sum_i [a_i x_i + (1 - x_i) q_i] \quad (3.1.1)$$

при ограничении

$$\sum_i x_i b_i \leq B \quad (3.1.2)$$

где B – величина средств, выделенных на ремонт мостовых сооружений в планируемом периоде.

Обозначим через $c_i = q_i - a_i$, $i = \overline{1, n}$. Тогда, как легко показать, задача минимизации (3.1.1) эквивалентна задаче максимизации

$$C(x) = \sum_i c_i x_i \quad (3.1.3)$$

при ограничении (3.1.2). Задача (3.1.3), (3.1.2) называется «задачей о ранце».

Эффективные алгоритмы ее решения основаны на методах динамического и дихотомического программирования.

Рассмотрим задачу формирования перспективных планов ремонта на несколько периодов. Обозначим $x_{ik} = 1$, если ремонт моста i включен в план

ремонта k -го периода, $x_{ik}=0$ в противном случае, q_{ik} - ущерб в случае, если ремонт моста i включен в план ремонта k -го периода, b_{ik} - затраты на ремонт моста i , если ремонт производится в периоде k , B_k - величина средств, выделенных на ремонт мостовых сооружений в периоде k .

Возможны два варианта. В первом варианте средства, выделенные в периоде k , могут быть использованы только в этом периоде. Во втором варианте средства неиспользованные в периоде k , можно использовать в более поздних периодах. Соответственно, получаем две задачи оптимизации планов ремонта.

Задача 2. Определить $\{x_{ik}\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, T}$ (T - число периодов планирования) минимизирующие

$$Q(x) = \sum_{i,k} q_{ik} x_{ik} \quad (3.1.4)$$

при ограничении

$$\sum_i b_{ik} x_{ik} \leq B_k, \quad k = \overline{1, T} \quad (3.1.5)$$

$$\sum_{k=1}^T x_{ik} = 1 \quad (3.1.6)$$

Условия (3.1.5) отражают ограниченность средств, выделенных в периоде k , а ограничения (3.1.6) отражают условия ремонта любого моста в одном и только одном периоде.

Задача 3. Определить $\{x_{ik}\}$, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, T}$ (T - число периодов планирования) минимизирующие (3.1.4) при ограничениях (3.1.6) и

$$\sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^n b_{is} x_{is} \leq Q_k, \quad (3.1.7)$$

где

$$Q_k = \sum_{s=1}^k B_s \quad (3.1.8)$$

Ограничения (3.1.6) отражают требования ремонта всех мостов за T периодов. Отметим, что даже задача существования допустимого решения в общем случае является сложной задачей дискретной оптимизации.

3.2. Методы решения задачи минимизации ущерба

Как уже отмечалось, задача (3.1.1) – (3.1.2) сводится к известной «задаче о ранце». Рассмотрим алгоритм ее решения, основанный на методе дихотомического программирования []. Описание алгоритма приведем на примере.

Пример 3.2.1. Пусть число мостов равно 4. Данные об ущербах и затратах приведены в табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1

i	1	2	3	4
a_i	30	70	40	60
q_i	60	110	90	140
C_i	30	40	50	80
b_i	10	15	20	25

Примем величину выделенных средств $V=45$. Получаем следующую задачу о ранце: максимизировать

$$C(x)=30x_1+40x_2+50x_3+80x_4$$

при ограничении

$$10x_1+15x_2+20x_3+25x_4 \leq 45$$

Сначала получим дихотомическое представление задачи. Возможный вариант приведен на рис. 3.2.1.

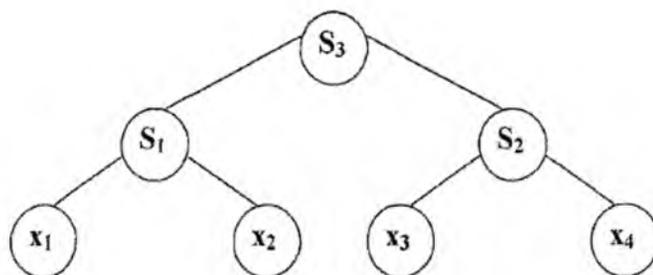


Рис. 3.2.1

В этом варианте сначала решаются локальные задачи оптимизации для первого и второго мостов, а также для третьего и четвертого, а затем на основе этих решений решается задача оптимизации для всех мостов.

1. Решение задачи для первого и второго мостов. Решение удобно представлять в виде следующей таблицы

$S_1:$	40	70
	25	25
	x_2	30
	x_1	10

Верхнее число каждой клетки равно ущербу, а нижнее – затратам для соответствующего варианта плана. Вариантов всего четыре: не включать в план ни первый, ни второй мост, включить в план только первый мост, включить только второй мост, включить оба моста.

2. Решение задачи для третьего и четвертого мостов.

$S_2:$	80	130
	25	45
	x_4	50
	x_3	20

3. Решение задачи для всех мостов.

$S_3:$	130			
	45			
	80	110	120	
	25	35	40	
	50	80	90	120
	20	30	35	45
	x_4	30	40	70
	x_3	10	15	25

Прочерки в таблице соответствуют вариантам плана, требующим средств больше, чем выделено. Для определения оптимального плана нахо-

дим в таблице клетку с максимальным верхним числом. Это клетка (130;45) на пересечении первого столбца и четвертой строки. Ей соответствует план, в котором ремонтируются третий и четвертый мосты. Ущерб при этом составит

$$60+110+40+60=270.$$

3.3. Задача минимизации ущерба для случай двух периодов

Рассмотрим задачу 2 для двух периодов. Обозначим $x_{i1}=x_i$, а $x_{i2}=1-x_i$. В этом случае задача принимает вид: минимизировать

$$\sum_i q_{i1} x_i + \sum_i q_{i2} (1 - x_i)$$

при ограничениях

$$\sum b_{ik} x_i \leq B_1,$$

$$\sum b_{i2} (1 - x_i) \leq B_2,$$

Обозначим $C_i = q_{i2} - q_{i1}$, $i = \overline{1, n}$

$$D_2 = \sum_i b_{i2} - B_2,$$

Нетрудно показать, что задача 2 эквивалентна задаче максимизации

$$\sum_i c_i x_i, \tag{3.3.1}$$

при ограничениях

$$\sum_i b_{i1} x_i \leq B_1, \tag{3.3.2}$$

$$\sum_i b_{i2} x_i \geq D_2, \tag{3.3.3}$$

Рассмотрим частный случай, когда

$$b_{i1} = b_i \cdot t_1, \quad b_{i2} = b_i \cdot t_2, \quad t_2 > t_1.$$

В этом случае ограничения (3.3.2), (3.3.3) принимает вид

$$g = \frac{D_2}{t_2} \leq \sum_i b_i \cdot x_i \leq \frac{B_1}{t_1} = G.$$

Получаем задачу максимизации (3.3.1) при ограничениях

$$g \leq \sum_i b_i x_i \leq G, \quad (3.3.4)$$

Это задача о ранце с двухсторонними ограничениями на общий вес предметов в ранце. Необходимым условием существования решения является, очевидно, $G \geq g$. Однако, это условие не является, достаточным, что видно из следующего примера.

Пример 3.3.1. Задача решается аналогично обычной задаче о ранце. Отличие наступает на последнем шаге при определении оптимального решения на основе результирующей таблицы. Среди клеток, у которых нижнее число удовлетворяет ограничениям (3.3.4) выбирается клетка с максимальной величиной (3.3.1).

Пример 3.3.2. Число мостов равно 4. Данные приведены в табл. 3.3.1.

Таблица 3.3.1

i	1	2	3	4
q_{i1}	3	6	2	5
q_{i2}	11	15	8	13
C_i	8	9	6	8
b_i	3	5	4	6

Примем величину $t_1=1, t_2=2, B_1=10, B_2=18$. В этом случае

$$G = \frac{B_1}{t_1} = 10, \quad g = 18 - \frac{18}{2} = 9.$$

Получаем следующую задачу о ранце с двухсторонними ограничениями: максимизированные

$$8x_1 + 9x_2 + 6x_3 + 8x_4$$

при ограничении

$$9 \leq 3x_1 + 5x_2 + 4x_3 + 6x_4 \leq 10$$

Возьмем структуру дихотомического представления рис. 3.2.1.

Рассмотрим результирующую таблицу

	14			
	10			
	8	16		
	6	9		
S_3 :	6	14	15	
	4	7	9	
S_2 / S_1	8	9	17	
	3	5	8	

Решений удовлетворяющих двустороннему ограничению всего три. Из них оптимальным является решение (16;9). Ему соответствует ремонт первого и четвертого моста в первом периоде и второго и третьего – во втором.

В общем случае двух периодов получаем задачу целочисленного линейного программирования в переменных 0;1 с двумя ограничениями.

Применим метод сетевого программирования. Сформируем оценочную задачу. Она представляет собой совокупность двух задач о ранце. Разделим C_i на две части

$$C_i = C_{i1} + C_{i2}.$$

Первая оценочная задача заключается в максимизации

$$\sum_1 C_{i1} x_i,$$

при ограничении (3.3.2),

а вторая в максимизации

$$\sum_1 C_{i2} x_i,$$

при ограничении (3.3.3).

Возьмем $C_{i2} = -b_2$. В этом случае вторая оценочная задача сведется к минимизации

$$\sum_1 b_2 x_i, \quad (3.3.5)$$

при ограничении (3.3.3).

Обозначим $A_1(C_1)$ значение целевой функции в оптимальном решении первой оценочной задачи, а $A_2(C_2)$ – второй, тогда верхняя оценка целевой функции оптимального решения исходной задачи будет равна

$$A(C) = A_1(C_1) - A_2(C_2)$$

Описанный метод получения верхних оценок служит основой для метода ветвей и границ.

1 шаг. Решаем первую оценочную задачу о ранце. Если полученное решение является оптимальным решением для второй задачи, то оно является оптимальным для исходной задачи. В противном случае переходим к шагу 2.

2 шаг. Выбираем одну из переменных i (рекомендуется выбрать переменную, которой соответствует максимум отношений C_{i1}/b_{i1}). Рассматриваем два подмножества решений. В первом подмножестве $x_i=1$, а во втором - $x_i=0$. Получаем верхние оценки для целевых функций подмножеств решая первую и вторую оценочные задачи. Выбираем подмножество с максимальной оценкой. Далее действуем согласно стандартной процедуре метода ветвей и границ, то есть выбранное подмножество делим на два, оцениваем их, выбираем из всех полученных подмножеств то, которое имеет наибольшую верхнюю оценку и т.д., пока не получим решение исходной задачи, значение целевой функции которого не меньше, чем верхние оценки остальных подмножеств.

Пример 3.3.3 Число мостов равно 6. Данные приведены в табл. 3.3.2.

Таблица 3.3.2

i	1	2	3	4	5	6
q_{i1}	13	15	10	8	12	15
q_{i2}	19	23	19	11	14	19
C_i	6	8	9	3	2	4
b_{i1}	2	3	3	5	7	5
b_{i2}	2	1	3	5	8	4

Применим $V_1=10, V_2=15$

В этом случае

$$D_2 = \sum_i b_{i2} - B_2 = 23 - 15 = 8,$$

Заметим, что если $C_{i2} = -b_{i2}$, то $C_{i1} = C_i + b_{i2}$.

Первая оценочная задача: максимизировать

$$8x_1 + 9x_2 + 12x_3 + 8x_4 + 10x_5 + 8x_6$$

при ограничении

$$2x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 7x_5 + 5x_6 \leq 10$$

Применяя описанный выше алгоритм, получим решение этой задачи

$$x_1 = x_2 = x_3 = 1, x_4 = x_5 = x_6 = 0, A_1 = 29$$

Вторая оценочная задача: минимизировать

$$2x_1 + x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 8x_5 + 4x_6$$

при ограничении

$$2x_1 + x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 8x_5 + 4x_6 \geq 8$$

Решение этой задачи, очевидно $A_2 = 8$. Оценка сверху решения исходной задачи $A = A_1 - A_2 = 21$. Заметим, что оптимальное решение первой оценочной задачи не является оптимальным для второй. Поэтому применяем метод ветвей и границ.

Разбиваем множество всех решений на два подмножества. В первом подмножестве $x_1 = 1$, а во втором $x_1 = 0$.

Оценка первого подмножества уже получена выше $A(x_1 = 1) = 21$. Оценим второе подмножество.

Если $x_1 = 0$, то оптимальное решение первой оценочной задачи будет $x_1 = x_3 = 1$, остальные $x_i = 0$, $A_1 = 21$. Для второй оценочной задачи, по-прежнему $A_2 = 8$. Имеем оценку сверху для второго подмножества $A = 13$. Выбираем первое подмножество на два, в одном из которых $x_3 = 1$, а в другом - $x_3 = 0$. Оценка первого подмножества. Имеем $A_1 = 29$, $A_2 = 9$, $A(x_1 = 1, x_3 = 1) = 20$.

Оценка второго подмножества: $A_1 = 25$, $A_2 = 8$, $A(x_1 = 1, x_3 = 0) = 17$.

Выбираем первое подмножество. Разбиваем его на два. В первом $x_2 = 1$, а во втором $x_2 = 0$.

Оценка первого подмножества: в этой задаче нет допустимых решений для исходной задачи, поскольку если $x_1=x_2=x_3=1$, то все остальные $x_i=0$, что не удовлетворяет второму ограничению.

Оценка второго подмножества: $A_1=25$, $A_2=9$, $A(x_1=1, x_3=1, x_2=0)=16$.

Сравнивая оценки всех подмножеств, выбираем подмножество $x_1=1$, $x_3=0$ с наибольшей оценкой $A=17$. Разбиваем его на два подмножества. В первом $x_2=1$, а во втором $x_2=0$.

Оценка первого подмножества: $A_1=25$, $A_2=8$, $A(x_1=1, x_3=0, x_2=1)=17$.

Оценка второго подмножества: $A_1=18$, $A_2=10$, $A(x_1=1, x_3=0, x_2=0)=8$.

Выбираем первое подмножество. Разбиваем его на два. В первом $x_4=1$, а во втором $x_4=0$. Оценка первого подмножества: $A_1=25$, $A_2=8$, $A(x_1=1, x_3=0, x_2=1, x_4=1)=17$.

Заметим, что решение первой оценочной задачи является оптимальным решением для второй оценочной задачи. Поэтому это решение является оптимальным для исходной задачи.

Дерево ветвей приведено на рис. 3.3.1.

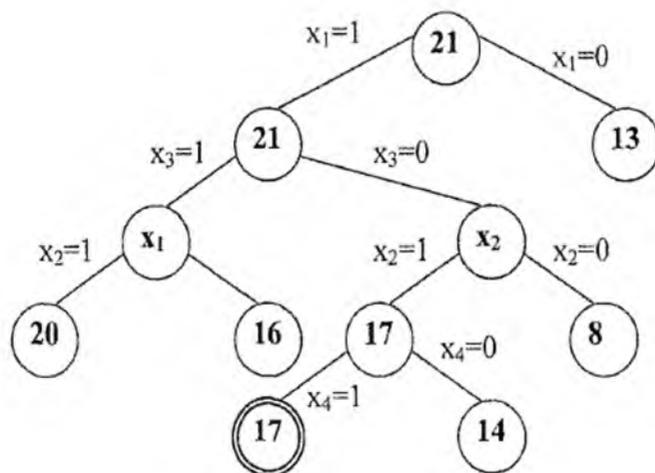


Рис. 3.3.1

Рассмотрим случай, когда средства неиспользованные в первом периоде, можно использовать во втором. В этом случае ограничения (3.3.2) остаются, а ограничение (3.3.3) заменяется на другое

$$\sum_1 x_i b_{i1} + \sum_1 (1 - x_i) b_{i2} \leq B_1 + B_2,$$

которое после несложных преобразований принимает вид

$$\sum_i (b_{i2} - b_{i1})x_i \geq \sum_i b_{i2} - (B_1 + B_2). \quad (3.3.6)$$

Задача решается на основе метода ветвей и границ с получением верхних оценок на основе метода сетевого программирования, как и в случае предыдущей задачи.

Пример 3.3.4. Возьмем данные из примера 3.3.3. Ограничение (3.3.6) запишется в виде

$$0x_1 - 2x_2 + 0x_3 + 0x_4 + x_5 + x_6 \geq -2$$

Получая как и ранее $C_{i2} = -(b_{i2} - b_{i1})$, сформулируем оценочные задачи.

Первая оценочная задача:

максимизировать

$$6x_1 + 6x_2 + 9x_3 + 3x_4 + 3x_5 + 3x_6$$

при ограничении

$$2x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 7x_5 + 5x_6 \leq 10$$

Вторая оценочная задача:

минимизировать

$$-2x_2 + x_5 - x_6$$

при ограничении

$$-2x_2 + x_5 - x_6 \geq -2$$

Заметим, что в данном случае оптимальное решение первой оценочной задачи $x_1 = x_2 = x_3 = 1$, остальные $x_i = 0$ является оптимальным решением и для второй оценочной задачи. Поэтому это решение является оптимальным и для исходной задачи.

Величина потерь в полученном решении равна

$$13 + 15 + 10 + 11 + 14 + 19 = 82,$$

что меньше, чем в предыдущем случае – 88.

3.4. Решение задачи для случая трех периодов

В случае трех периодов задача по аналогии с случаем двух периодов может быть представлена в виде задачи целочисленного линейного программирования. Для этого обозначим $x_{ik}=1$, если ремонт i -го моста включен в план ремонта k -го периода и $x_{ik}=0$, в противном случае.

Если передача средств, неиспользованных в k -ом периоде, в более поздние периоды запрещена, то получаем задачу 1.

Задача 1. Определить $\{x_{ik}\}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}$, минимизирующие

$$A(x) = \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^n q_{ik} x_{ik}, \quad (3.4.1)$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^3 x_{ik} = 1, \quad (3.4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n b_{ik} x_{ik} \leq R_k, \quad (3.4.3)$$

Ограничение (3.4.2) означает, что каждый мост включается в план одного и только одного периода.

Если средства, неиспользованные в данном периоде, можно использовать в последующих периодах, то получаем задачу 2.

Задача 2. Определить $\{x_{ik}\}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3}$, минимизирующие (3.4.1) при ограничениях (3.4.2) и

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n b_{ij} x_{ij} \leq Q_k, \quad (3.4.4)$$

Рассмотрим несколько частных случаев задачи. Начнем с задачи 2. Примем, что

$$q_{ik} = q_i \cdot p_k, \quad i = \overline{1, n}, k = \overline{1, 3},$$

$$b_{ik} = b_i \quad \text{для всех } i, k$$

Необходимым и достаточным условием существования решения задачи является

$$\sum_i b_i \leq Q_3,$$

Рассмотрим следующие две задачи о ранце.

Первая задача о ранце: Определить $x_i = 0;1$, $i = \overline{1, n}$, максимизирующие

$$\sum_{i=1}^n x_i q_i, \quad (3.4.5)$$

при ограничении

$$\sum_{i=1}^n x_i b_i \leq Q_1, \quad (3.4.6)$$

Вторая задача о ранце: определить $x_i = 0;1$, $i = \overline{1, n}$, максимизирующие (3.4.5) при ограничении

$$\sum_{i=1}^n x_i b_i \leq Q_2, \quad (3.4.7)$$

Обозначим W_1 – множество $x_i=1$ в первой задаче, W_2 – множество $x_i=1$ во второй задаче. Соответственно

$$A(W_1) = \sum_{i \in W_1} q_i$$

$$A(W_2) = \sum_{i \in W_2} q_i$$

Теорема 3.4.1. Величина

$$A = p_1 A(W_1) + p_2 (A(W_2) - A(W_1)) + p_3 \left(\sum_i q_i - A(W_2) \right).$$

Является оценкой снизу минимальных потерь для исходной задачи.

Доказательство. Рассмотрим следующую задачу оптимизации: определить y_k , $k=1, 2, 3$, минимизирующие

$$\sum_{k=1}^3 p_k y_k, \quad (3.4.8)$$

при ограничениях

$$y_1 \leq A(W_1)$$

$$y_1 + y_2 \leq A(W_2)$$

$$y_1 + y_2 + y_3 = \sum_1 q_i = A \quad (3.4.9)$$

при условии, что $p_1 < p_2 < p_3$.

Покажем, что оптимальное решение имеет вид

$$y_1 = A(W_1), y_2 = A(W_2) - A(W_1). \quad (3.4.10)$$

$$y_3 = \sum_1 q_i - A(W_2).$$

Для этого выпишем действенную задачу: определить $u_1 \geq 0, u_2 \geq 0, u_3$, максимизирующие

$$-A(W_1)u_1 - A(W_2)u_2 + A \cdot u_3,$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} -u_1 - u_2 + u_3 &\leq p_1 \\ -u_2 + u_3 &\leq p_2 \\ u_3 &\leq p_3 \end{aligned}$$

Возьмем допустимое решение

$$u_3 = p_3, u_2 = p_3 - p_2, u_1 = p_2 - p_1$$

Величина целевой функции для этого решения

$$\begin{aligned} &-A(W_1)(p_2 - p_1) - A(W_2)(p_3 - p_2) + Ap_3 = \\ &= p_1 A(W_1) + p_2 (A(W_2) - A(W_1)) + p_3 (A - A(W_2)) \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

совпадает с величиной целевой функции прямой задачи для решения (3.4.10).

Поэтому оба решения являются оптимальными.

Возьмем любое допустимое решение исходной задачи $\{x_{ik}\}$.

Определим

$$y_k = \sum_{i=1}^n q_i x_{ik}.$$

В этом случае целевая функция (3.4.8) совпадает с целевой функцией исходной задачи 2. Ограничения (3.4.9) выполняются для любого допустимого решения. Поэтому величина (3.4.11) является оценкой снизу целевой функции исходной задачи. Теорема доказана.

Следствие 3.4.1. Пусть имеет место

$$W_1 \subset W_2$$

В этом случае план, в котором в первом периоде ремонтируются мосты множества W_1 , во втором – множества W_2/W_1 , а в третьем – все остальные, является оптимальным.

Доказательство сразу следует из теоремы 3.4.1, поскольку в этом случае значение целевой функции данного плана совпадет с нижней оценкой.

Пример 3.4.1. Имеется шесть мостов значением и которых приведены в табл. 3.4.1.

Таблица 3.4.1.

I	1	2	3	4	5	6
q_i	16	21	15	30	20	12
b_i	4	6	5	12	10	8

Примем $p_1=1, p_2=2, p_3=3, R_1=11, R_2=17, R_3=17$.

Сразу решаем вторую задачу, поскольку решение задачи о ранце для значения Q_2 даст и решение этой задачи для Q_1 . Задачу решим методом дихотомического программирования. Структура дихотомического представления задачи приведена на рис. 3.4.1.

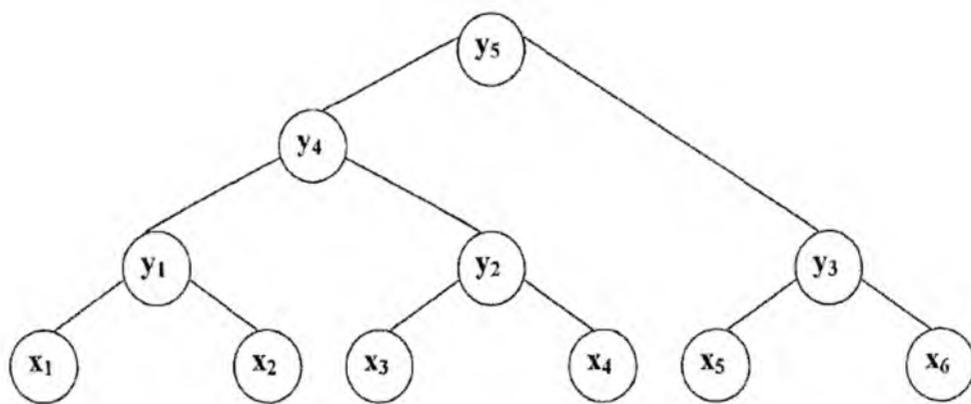


Рис. 3.4.1.

1 шаг. Строим таблицу (y_1)

$$(y_1) = \begin{array}{|c|c|} \hline 21 & 37 \\ \hline 6 & 10 \\ \hline \end{array}$$

x_2	16
x_1	4

2 шаг. Строим таблицу (y_2)

30	45
12	17
x_4	15
x_3	5

3 шаг. Строим таблицу (y_3)

12	32
8	18
x_6	20
x_5	10

4 шаг. Строим таблицу (y_4)

45	61	66	82
17	21	23	27
30	46	51	67
12	16	18	22
15	31	36	52
5	9	11	15
y_2	16	21	37
y_1	4	6	10

5 шаг. Строим таблицу (y_5)

20	36	41	51	57	72			
10	14	16	19	20	25			
12	28	33	43	49	64			
8	12	14	17	18	23			
y_2	15	21	3	37	52	61	67	82
y_1	4	6	9	10	15	21	22	27

В таблицу (y_5) не включены доминируемые варианты, а также варианты с величиной $Q_2 > 28$. Имеем при $Q_2 = 28$ оптимальное решение $y_3=0$, $y_4 = [82; 27; 15]$. Определяем

$$W_2 = (1, 2, 3, 4)$$

Находим оптимальное решение первой задачи $Q_1 = R_1 = 11$. Имеем из таблицы (y_5) $y_3 = 0$, $y_4 = [37; 10]$

$$W_1 = (1, 2)$$

Поскольку $W_1 \subset W_2$, то мы получили оптимальное решение исходной задачи 2. А именно, в первом периоде в план ремонта включаются мосты 1 и 2, во втором периоде – мосты 3 и 4, и, наконец, в третьем периоде – мосты 5 и 6. Суммарный ущерб за три периода составит

$$1 \cdot 37 + 2 \cdot 45 + 3 \cdot 32 = 223.$$

Если условие $W_1 \subset W_2$ не имеет места, то величина (3.4.11) является только нижней оценкой. В этом случае для решения задачи применяется метод ветвей и границ с использованием оценки (3.4.11).

Пример 3.4.2. Имеется пять мостов, данные о которых приведены в таблице 1.3.

Структура дихотомического представления приведена на рис. 3.4.2.

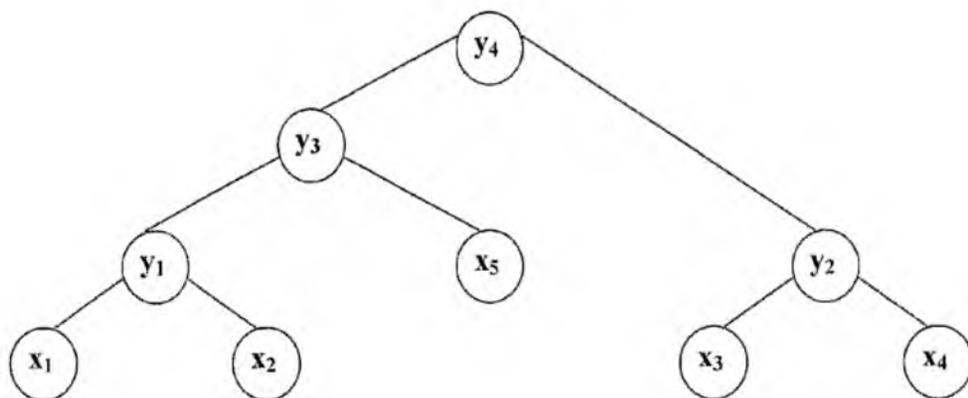


Рис. 3.4.2.

Приведем только результирующую таблицу (y_4)

	20	29	41		
	10	15	17		
$(y_4)=$	y_2	9	21	30	37
	y_3	6	7	15	15

Находим оптимальное решение первой задачи при $Q_1 = 6$. Из таблицы (y_4) получаем $y_2 = 0$, $y_3 = [9; 6]$, что соответствует решению $W_1 = (5)$.

Находим оптимальное решение второй задачи при $Q_2 = 20$. Из таблицы (y_4) получаем $y_4 = [41; 17]$, $y_2 = [20; 10]$, $y_3 = [21; 7]$, что соответствует решению $W_2 = (2,4)$. Так как $W_1 \not\subset W_2$, то получаем оценку снизу

$$\Phi = 1 \cdot 9 + 2(41 - 9) + 3 \cdot 40 = 193$$

Применим метод ветвей и границ. Естественно, что для разбиения на подмножества целесообразно выбрать переменную $x_i \in W_1$ с тем, чтобы повысить вероятность получения решений, удовлетворяющих условию $W_1 \subset W_2$. Выберем переменную x_5 и разобьем множество всех решений на два подмножества. В первом подмножестве $x_5 = 1$, а во втором - $x_5 = 0$.

Оценка первого подмножества.

Если $x_5 = 1$, то для первой задачи решение остается прежним $W_1 = (5)$. Для второй задачи решение меняется.

Следует из таблицы (y_5) исключить все строки и столбцы, в которых $x_5 = 0$. В нашем случае это столбцы третий и пятый в таблице (y_4) . Теперь оптимальное решение $y_4 = [30; 13]$ и ему соответствует $W_2 = (2; 5)$.

Полученный план, в котором в первом периоде ремонтируется пятый мост, во втором второй, а остальные в третьем являются оптимальным в первом подмножестве. Оценка этого подмножества равна

$$\Phi(x_5=1) = 1 \cdot 9 + 2(30 - 9) + 3 \cdot 51 = 204.$$

Оценка второго подмножества, поскольку во втором подмножестве $x_5 = 0$, то из таблицы (y_4) необходимо удалить строки (столбцы), которые соответствуют значению $x_5 = 1$. Это второй и четвертый столбцы. Имеем для

первой задачи $W_1 = \emptyset$. Для второй задачи $W_2 = (2, 4)$. Оценка второго подмножества

$$\Phi(x_s=0) = 1 \cdot 0 + 2 \cdot 41 + 3 \cdot 40 = 202 < 204.$$

Таким образом, соответствующий план ремонта, в котором в первом периоде не ремонтируется ни одного моста, во втором – второй и четвертый, а в третьем все остальные, является оптимальным.

Замечание. В принципе в первом периоде, можно начать ремонт второго или четвертого (либо второго и четвертого вместе) мостов. Однако, завершить ремонт можно только во втором периоде. Это может привести к затягиванию продолжительности ремонта и дополнительным потерям.

Обобщим описанный подход на случай, когда затраты также изменяются от периода к периоду, то есть

$$b_{ij} = b_i \cdot d_j.$$

Первая задача о ранце почти совпадает с задачей (3.4.5), (3.4.6):

Определить $x_i = 0, 1$, $i = \overline{1, n}$, максимизирующие

$$\sum_i x_i q_i \quad (3.4.12)$$

при ограничении

$$\sum_i x_i b_i \leq \frac{Q_1}{d_1} \quad (3.4.13)$$

По-прежнему, обозначим, W_1 – решение первой задачи (множество переменных $x_i = 1$), $A(W_1)$ – величину (3.4.12) в этом решении.

Для оценки $A(W_2)$ построим следующим образом. Обозначим

$$0 \leq z_1 \leq Q_1,$$

количество средств, расходуемых в первом периоде, $D_1(z_1)$ – значение целевой функции в оптимальном решении задачи (3.4.12), (3.4.13), где $Q_1 = z_1$. Значение целевой функции в оптимальном решении задачи (3.4.12), (3.4.13), где в правой части неравенства (3.5.13) стоит

$$\frac{Q_2 - z_1}{d_2}$$

Определим

$$A(W_2) = \max_{z_1} [D_1(z_1) + D_2(z_1)] \quad (3.4.14)$$

где W_2 – оптимальное решение задачи (3.4.12), (3.4.13) при величине z_1 , при которой достигается максимум в (3.4.14).

Покажем, что $A(W_2)$, по-прежнему является оценкой сверху суммарного ущерба в двух периодах планирования. Действительно, оптимальному решению задачи соответствует некоторая величина z_1 . Поэтому ущерб в первом периоде составит не менее $D_1(z_1)$, а во втором – не менее $D_2(z_1)$. Очевидно, что (3.4.14) дает верхнюю оценку суммарного ущерба без учета дисконтирующих множителей p_k . Теперь можно получить нижнюю оценку целевой функции исходной задачи по формуле (3.4.11).

Лемма. Если $W_1 \cap W_2 = \emptyset$, то полученное решение, в котором в первом периоде ремонтируется множество мостов W_1 , во втором множество мостов W_2 , а в третьем – все остальные, является оптимальным решением исходной задачи.

Пример 3.4.3. Возьмем данные из примера 3.2.3 (табл. 3.2.1). Примем

$$\begin{aligned} p_1=1, & \quad p_2=2, & \quad p_3=3, \\ d_1=1, & \quad d_2=2, & \quad d_3=3, \\ R_1=8, & \quad R_2=30, & \quad R_3 \geq 60, \end{aligned}$$

Решаем первую задачу. Получаем

$$W_1=(2), \quad A(W_1)=21.$$

Решаем вторую задачу. Заметим, что Z_1 может принимать три значения: $z_1=0$, $z_1=6$, и $z_1=7$

Имеем

$$\begin{aligned} D_1(0)=0, & \quad D_2(0)=41, \\ D_1(6)=9, & \quad D_2(6)=37, \\ D_1(7)=21, & \quad D_2(7)=37, \end{aligned}$$

Максимум $D_1(z_1) + D_2(z_1) = 0$ достигается при $z_1=7$ и этот максимум равен

$$A(W_2)=58.$$

а множество $W_2=(1, 2)$. Поскольку $W_1 \cap W_2 \neq \emptyset$, то получаем оценку снизу ущерба

$$\Phi=1 \cdot 21+2 \cdot 37+3 \cdot 17=146.$$

Для разбиения на подмножества целесообразно выбрать переменную x_2 . Разбиваем множество всех решений на два подмножества. В первом подмножестве мост 2 ремонтируется в первом периоде, а во втором не ремонтируется.

Оценка первого подмножества. Поскольку $x_2=1$, то оптимальное решение получается в результате решения следующей задачи о ранце: максимизировать $16x_1+15x_3+20x_4+9x_5$

$$\text{при ограничении } 8x_1+12x_3+10x_4+6x_5 \leq \frac{30+1}{2}=15,5.$$

Оптимальное решение $x_1=1, x_5=1$, остальные $x_i=0$.

$$\text{Имеем } \Phi(x_1=1)=1 \cdot 21+2 \cdot 25+3 \cdot 35=176.$$

Оценка второго подмножества

Для первой задачи имеем

$$W_1=(1), \quad A(W_1)=16.$$

Так как $x_2=0$, то при решении второй задачи z_1 может принимать следующие три значения $z_1=0, z_1=6$, и $z_1=8$.

При $x_2=0$ результирующая таблица (y_4) изменится поскольку доминируемая ранее клетка $[16;8]$ в таблице (y_1) становится не доминируемой таблица (y_4) принимает вид

$$(y_4)=$$

	20	29	36	
	10	16	18	
y_2		9	16	25
y_3		6	8	14

Имеем

$$D_1(0)=0, \quad D_2(0)=36,$$

$$D_1(6)=9, \quad D_2(6)=29,$$

$$D_1(8)=16, \quad D_2(8)=25.$$

Максимум $D_1(z_1) + D_2(z_1)$ достигается при $z_1=8$ и равен 41. Ему соответствует $W_2=(1, 5)$. Так как $W_1 \cap W_2 \neq \emptyset$, то нижняя оценка равна

$$\Phi(x_1=0)=1 \cdot 16 + 2 \cdot 25 + 3 \cdot 40 = 186.$$

Выбираем первое подмножество с меньшей оценкой. Итак, в оптимальном решении в первом периоде ремонтируется второй мост, во втором – первый и пятый, в третьем – все остальные. Минимальный ущерб составляет 176.

3.5. Приближенный алгоритм решения задачи

В основе описываемого ниже приближенного алгоритма решения задачи лежит следующее допущение.

Допущение. Пусть получено решение, в котором в первом периоде расход средств составляет

$$0 \leq z_1 \leq R_1.$$

Тогда множество мостов, ремонтируемых в первом периоде определяется из решения следующей задачи: максимизировать

$$\sum_i q_i x_i \tag{3.5.1}$$

при ограничении

$$\sum_i q_i x_i \tag{3.5.2}$$

Если принять это допущение, то алгоритм заключается в переборе всех значений z_1 . Для каждого z_1 определяется множество $W_1(z_1)$ мостов, ремонтируемых в первом периоде (в результате решения задачи (3.5.1), (3.5.2)). Множество мостов $W_2(z_1)$ ремонтируемых во втором периоде для каждого z_1 определяется в результате решения следующей задачи:

максимизировать

$$\sum_{i \in W_1(z_1)} q_i x_i \quad (3.5.3)$$

при ограничении

$$\sum_{i \in W_1(z_1)} b_i x_i \leq \frac{Q_2 - z_1}{d_2} \quad (3.5.4)$$

Из полученных решений выбирается лучшее.

Пример 3.5.1. Рассмотрим алгоритм на данных примера 3.4.3. Величина z_1 может принимать три значения $z_1=0$, $z_1=6$, и $z_1=7$.

Возьмем $z_1=0$. Имеем

$$W_1(0)=\emptyset \quad W_2(0)=(2;4).$$

$$\Phi(z_1=0)=1 \cdot 0 + 2 \cdot 41 + 3 \cdot 40 = 202.$$

Возьмем $z_1=6$. Имеем

$$W_1(6)=(5) \quad W_2(6)=(1;2).$$

$$\Phi(z_1=6)=1 \cdot 9 + 2 \cdot 37 + 3 \cdot 35 = 188.$$

Возьмем $z_1=7$. Имеем

$$W_1(7)=(2) \quad W_2(7)=(1;5).$$

$$\Phi(z_1=7)=1 \cdot 21 + 2 \cdot 25 + 3 \cdot 35 = 176.$$

Лучшее решение $W_1=(2)$, $W_2=(1;5)$, $W_3=(3;4)$ с величиной ущерба 176. Как было показано выше, это решение является оптимальным. Приведем пример, показывающий, что принятое допущение, вообще говоря может не иметь места.

Пример 3.5.2. Имеются три моста, данные о которых приведены в табл. 3.5.1.

Таблица 3.5.1

i	1	2	3
q_i	12	9	5
b_i	8	3	5

Примем

$$\begin{array}{lll}
 p_1=1, & p_2=2, & p_3=3, \\
 d_1=1, & d_2=2, & d_3=3, \\
 R_1=8, & R_2=6, & R_3=15.
 \end{array}$$

Оптимальное решение как нетрудно показать имеет вид:

$$W_1=(1), \quad W_2=(2), \quad W_3=(3).$$

Ущерб составляет

$$\Phi=1 \cdot 12+2 \cdot 9+3 \cdot 5=45.$$

Однако, при $z_1=8$, оптимальное решение задачи (3.5.1) и (3.5.2) имеет вид:

$$W_1=(2;3)$$

При этом допустимого решения вообще не существует, поскольку на первый проект во втором периоде средств не хватает. Не хватает их и в третьем периоде, так как

$$\frac{R_2 + R_3}{3} = \frac{21}{3} = 7 < b_1 = 8.$$

Если увеличить средства в третьем периоде до $R_3=18$, то первый мост можно включить в план ремонта третьего периода. Ущерб, однако, составит

$$\Phi=1 \cdot 14+2 \cdot 0+3 \cdot 12=50 > 45.$$

Тем не менее, как показали практические примеры, принятое допущение называется на практике получать решения, либо оптимальные, либо близкие к оптимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состояние парка мостовых сооружений характеризуется существенным сокращением количества деревянных и малых мостов при возрастании внеклассны мостовых сооружений, содержание которых под силу только федеральному бюджету. При этом качество сооружений меняется к лучшему очень медленно, а достигнутый срок службы крайне недостаточен. В то же время большинство из эксплуатируемых мостовых сооружений рассчитаны на нагрузки, близкие к современным, что увеличивает число ремонтнопригодных сооружений.

Отмечается, что мостовое сооружение за свою жизнь проходит три важнейших этапа эксплуатации:

1 этап характеризуется тем, что построенное сооружение эксплуатируется какое-то время без снижения надежности. На данном этапе эксплуатации за мостом осуществляется лишь уход. Продолжительность этого периода зависит от качества строительства и составляет, к сожалению, пока не так много, как правило от 5 до 10 лет.

2 этап эксплуатации характеризуется появлением и развитием дефектов, изменением свойств бетона и коррозией арматуры. Продолжительность второго этапа, например для пролетного строения, определяется временем, за которое вероятность безотказной работы пролетного строения снижается до 0,90, т.е. индекс надежности с 3,0 уменьшается до 1,3 [5]. За этот период за мостом ведется уход и периодические профилактические работы в рамках работ по содержанию. Продление указанного этапа, возможно при проведении планово-предупредительных работ (ППР).

3 этап эксплуатации сооружения характеризуется наличием в конструкциях, и в первую очередь в пролетных строениях и опорах, дефектов, снизивших их несущую способность и грузоподъемность моста в целом и введенными ограничениями по массе транспортного средства, которое может безопасно двигаться по мосту в неконтролируемом режиме, и необходимым периодическим последующим снижением грузоподъемности. Продолжительность

третьего этапа определяется временем достижения такого состояния сооружения, когда при максимально возможных ограничениях по временной нагрузке вероятность безотказной работы пролетных строений опять достигает 0,9.

Установлено, что только за счет мероприятий, осуществляемых при содержании, можно увеличить работоспособность сооружения с 20-25 лет (сегодняшний уровень) до 40-70 лет в зависимости от вкладываемых средств. Как следствие, можно увеличить предельный срок службы до 70-100 лет, а при соответствующей политике ремонта - более 100 лет. При выполнении всех требований по содержанию и обеспечению нормального качества строительства вполне возможно, что за весь срок службы моста не потребуются вложений больших средств в ремонт, а будет осуществляться менее капиталоемкое вложение в надзор, уход, профилактику и мелкий ремонт (ППР).

Теоретической основой содержания мостовых сооружений является сохранение надежности и повышение долговечности конструкций за счет своевременного выполнения в необходимом (научно-обоснованном) объеме комплекса мероприятий на различных этапах функционирования сооружения. К таким «мероприятиям» относятся 120 видов конкретных работ, объединенных в три группы: уход, профилактика, планово-предупредительные работы (ППР).

Основной задачей службы эксплуатации мостов является не только получение и накопление информации о состоянии парка мостовых сооружений страны, но и дифференцированно распределять средства, то есть регулировать финансирование в зависимости от принятой стратегии эксплуатации. При правильном содержании объекта, то есть выполнении работ, относящихся в первую очередь к надзору, уходу, профилактике вообще может не потребоваться ремонта. Это видно из сопоставления затрат при разных стратегиях эксплуатации. В работе представлены схемы затрат при десяти стратегиях эксплуатации - от так называемой "нулевой стратегии" ("Do Nothing" - ничего не делаем, то есть не вкладываем средств в сооружение

после его строительства) до стратегии с полным использованием всей номенклатуры работ.

Таким образом, возникает задача оптимального выбора стратегии содержания в рамках выделенного бюджета и формирования планов ремонтных работ. Решению этих задач и была посвящена данная диссертационная работа.

Перечислим основные результаты работы:

1. Проанализирован состав парка мостовых сооружений и определены тенденции развития системы эксплуатации мостов.
2. Определены основные варианты содержания мостовых сооружений и затраты, соответствующие каждому варианту.
3. Разработана модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов.
4. Определено множество Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.
5. Построена модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба.
6. Разработана модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов.
7. Получена нижняя оценка решения для задачи минимизации ущерба при нескольких периодах планирования.
8. Построен приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Ю.А. Оперативное планирование в целевых программах. Одесса: Маяк, 1990. - 132 с.
2. Автомобильные дороги общего пользования РФ. Справочник РДА. М., 2000.
3. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
4. Александров Н.И., Комков Н.И. Моделирование организации и управления решением научно-технических проблем. М.: Наука, 1988. – 216 с.
5. Алтаев В.Я., Бурков В.Н., Тейман А.И. Теория сетевого планирования и управления // Автоматика и Телемеханика. 1966. № 5.
6. Андронникова Н.Г., Баркалов С.А., Бурков В.Н., Котенко А.М. Модели и методы оптимизации региональных программ развития. (Препринт) – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2001.
7. Арнольд В.И. О функциях трех переменных. – ДАН СССР, 1957, № 2.
8. Ансоф И. Стратегическое управление. М.: Экономика, 1989. - 519 с.
9. Ануфриев И.К., Бурков В.Н., Вилкова Н.И., Рапацкая С.Т. Модели и механизмы внутрифирменного управления. М.: ИПУ РАН, 1994. - 72 с.
10. Багриновский К.А. Основы согласования плановых решений. М.: Наука, 1977. - 303 с.
11. Баркалов С.А. Теория и практика календарного планирования в строительстве. – Воронеж, ВГАСА, 1999. – 216 с..
12. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М., Семенов П.И. Минимизация упущенной выгоды в задачах управления проектами. – М.: 2001 (Научное издание / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН).
13. Баркалов П.С., Буркова И.В., Глаголев А.В., Колпачев В.Н. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами. – М.: 2002 (Научное издание / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН).

14. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. Методы агрегирования в управлении проектами. М.: ИПУ РАН, 1999. – 55 с.
15. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Курочка П.Н., Образцов Н.Н. Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике. М.: ИПУ РАН, 2000. – 58 с.
16. Баркалов С.А., Михин П.В. Моделирование и оптимизация плана проектных работ в строительстве // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/ Тульск. гос. ун-т. – Тула, 2005. С. 56-73.
17. Баркалов С.А., Семенов П.И., Потапенко А.М. Проблемы управления организационными проектами. В кн. Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. Межвузовский сб. научных трудов. Воронеж, ВГТУ, 2003 г. с. 275 – 279.
18. Баркалов С.А., Буркова И.В., В.Н. Колпачев, Потапенко А.М. Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. М.: 2004г.. 87 с.
19. Баркалов П.С., Матвеев И.К. Определение оптимальной очередности при линейном расположении объектов строительства. В кн. Современные сложные системы управления. Сборник научных трудов 5-ой международной конференции, Краснодар, 2004г. – с. 34-38.
20. Баркалов П.С., Глагольев А.В., Матвеев И.К. Оптимизация календарного плана работы предприятия при кольцевой системе расположения объектов строительства. В кн. Современные сложные системы управления. Сборник научных трудов 5-ой международной конференции, Краснодар, 2004г. – с. 62-69.
21. Баркалов С.А., Матвеев И.К. Задача планирования работ по ремонту мостовых сооружений. Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2005. – с. 254-258.

22. Баскаков А.С., Глагольев А.В., Матвеев И.К. Моделирование конкурсных механизмов в корпоративных структурах управления. Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 1/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2005. – с. 104 – 109.
23. Бир С. Мозг фирмы. М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.
24. Бобрышев Д.Н., Русинов Ф.М. Управление научно-техническими разработками в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
25. Богданов Д.А., Протопопов О.И., Левдиков В.И., Матвеев И.К. Модели прогнозирования для поддержки принятия стратегических решений В кн. Прикладные задачи моделирования и оптимизации. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, ВГТУ, 2004г. С. 62-71.
26. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1968. – 408 с.
27. Бурков В.Н. Распределение ресурсов как задача оптимального быстрогодействия // Автоматика и Телемеханика. 1966. № 7.
28. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. – М.: Наука. – 1977. – 327 с.
29. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. – М.: Радио и связь. – 2003. – 156 с.
30. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Мецниереба, 1974. - 234 с.
31. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Новиков Д.А., Юсупов Б.С. Модели и механизмы распределения затрат и доходов в рыночной экономике. М.: ИПУ РАН, 1997. – 60 с.
32. Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов. М.: Наука, 1989. - 245 с.
33. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в вероятностных моделях социально-экономических систем // Автоматика и Телемеханика. 1993. № 11. С. 3 - 30.

34. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы функционирования социально-экономических систем с сообщением информации // Автоматика и Телемеханика. 1996. № 3. С. 3 - 25.
35. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. – М.: СИНТЕГ – 2001. – 265 с.
36. Бурков В.Н., Квон О.Ф., Цитович Л.А. Модели и методы мультипроектного управления. М.: ИПУ РАН, 1998. – 62 с.
37. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. - 384 с.
38. Бурков В.Н., Ланда Б.Д., Ловецкий С.Е., Тейман А.И., Чернышев В.Н. Сетевые модели и задачи управления. М.: Советское радио, 1967. – 144 с.
39. Бурков В.Н., Ловецкий С.Е. Методы решения экстремальных задач комбинаторного типа. – Автоматика и телемеханика, 1968, № 11.
40. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. – 188 с.
41. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
42. Бурков В.Н. Новиков Д.А. Как управлять организациями. – М.: СИНТЕГ, 2004.
43. Бурков В.Н. и др. Сетевые модели и задачи управления. Библиотека технической кибернетики. М.: Советское радио, 1967.
44. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1972. Т. 1 – 3.
45. Васильев В.М., Зеленцов Л.Б. Автоматизация организационно-технологического планирования в строительном производстве. М.: Стройиздат, 1991. – 152 с.
46. Воронов А.А. Исследование операций и управление. М.: Наука, 1970. – 128 с.

47. Воропаев В.И., Любкин С.М., Голенко-Гинзбург Д. Модели принятия решений для обобщенных альтернативных стохастических сетей // Автоматика и Телемеханика. 1999. № 10. С. 144 – 152.
48. Воропаев В.И. Методические указания по декомпозиции объектов строительства на проектно-технологические модули. М.: ВНИИГМ, 1988. – 91 с.
49. Воропаев В.И. Модели и методы календарного планирования в автоматизированных системах управления строительством. М.: Стройиздат, 1974. – 232 с.
50. Воропаев В.И. Управление проектами в России. М.: Аланс, 1995.-225с.
51. Воропаев В.И., Шейнберг М.В. и др. Обобщенные сетевые модели. М.: ЦНИПИАС, 1971. – 118 с.
52. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. - 327 с.
53. Голенко Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука, 1968. – 400 с.
54. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. М.: Радио и связь, 1982. -144 с.
55. «Государственная концепция создания и развития сети автомобильных дорог в Российской Федерации» ФДС России (утверждено постановлением Правительства №438 от 17.04.99.) - М., 1999.
56. Гриценко Н.Л., Зеленова А.В., Колосова Е.В., Цветков А.В. От сметы к проекту / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами в переходной экономике. Москва, 1999.
57. Губко М.В. Задача теории контрактов для модели простого АЭ / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.
58. Губко М.В., Спрысков Д.С. Учет кооперативного взаимодействия активных элементов в механизмах распределения ресурса и активной экспертизы /

«Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.

59. Дингес Э.В., Шестериков В.И. Экономическая эффективность уширения мостов на автомобильных дорогах. - М.О 1983. - (Строительство и эксплуатация автомобильных дорог / ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. - Вып.1).

60. Еремеев В.П. Распределение ресурсов для ремонта мостов // Автомоб. дороги. - 1989, №9, - С. 24-25.

61. Зуховицкий С.И., Радчик И.А. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука, 1965. – 296 с.

62. Иванилов Ю.П., Лотов А.В. Математические модели в экономике. М.: Наука, 1979. - 304 с.

63. Инструкция по диагностике мостовых сооружений на автомобильных дорогах / ФДЦ Минтранса России. - М.: Информавтодор, 1996.

64. Инструкция по проведению осмотров мостов и труб на автомобильных дорогах: ВСН 4-81(90) / Минавтодор РСФСР. - М., 1990.

65. Инструкция по уширению автомобильных мостов: ВСН 51-88 / Минавтодор РСФСР. - М.: Транспорт, 1990.

66. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов: ВСН 32-89 / Минавтодор РСФСР. - М., 1991.

67. Инструкция по определению грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов / Миндорстой БССР. ВСН 36-84. Минск, 1984.

68. Интриллигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория. М.: Прогресс, 1975. - 606 с.

69. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

70. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986. - 238 с.

71. Классификация работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования. Распоряжение Росавтодора № ИС - 5р от 03.01.02.
72. Клименко С.В., Крохин И.В., Куш В.М., Лагутин Ю.Л. Электронные документы в корпоративных сетях. М.: Анкей, 1998. – 272 с.
73. Кокс Д., Хинкин Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978.- 558 с.
74. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных. – ДАН СССР, 1956, № 2.
75. Кодратьев В.Д., Матвеев И.К., Невгод В.Г. Оптимальное размещение объектов обслуживания. Теория активных систем Труды международной научно-практической конференции (16-18 ноября 2005г., Москва, Россия) С. 135.
76. Кононенко А.Ф., Халезов А.Д., Чумаков В.В. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: ВЦ АН СССР, 1991. – 211 с.
77. Концепция улучшения состояния мостовых сооружений федеральной сети автомобильных дорог России (на период 2002 - 2010 гг.). М.: Росавтодор, 2003. - 68 с.
78. Курочка П.Н. Моделирование задач организационно – технологического проектирования. Воронеж, ВГАСУ, 2004. 204 с.
79. Курочка П.Н., Баркалов С.А., Потапенко А.М. Механизмы распределения затрат при управлении проектами. Сборник трудов научно-практической отраслевой конференции «Системы автоматизированного управления производствами, предприятиями и организациями горнометаллургического комплекса». Старый Оскол, СТИ, 2003г. С. 144 – 149.
80. Курочка П.Н., Михин П.В. Оценка технологичности вариантов возведения каркаса на основе нечетких множеств // Современные сложные системы управления: Сб. научн. тр. 5-ой междунар. конф. Краснодар, 2004г. С. 125-129.
81. Курочка П.Н., Михин П.В. Оценка вариантов технологии возведения каркаса жилого здания на базе матриц логической свертки // Современные слож-

- ные системы управления: Сб. научн. тр. 5-ой междунар. конф. Краснодар, 2004г. С. 69-71.
82. Куликов Ю.А. Оценка качества решений в управлении строительством. М.: Стройиздат, 1990. – 144 с.
83. Либерзон В.И. Основы управления проектами. М.: Нефтяник, 1997. - 150 с.
84. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972 – 576 с.
85. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
86. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. - 271 с.
87. Лихотин Ю.П., Косенков К.В., Матвеев И.К. Механизмы распределения ресурсов сосредоточенных работ. В кн. Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий. Материалы международной конференции и российской научной школы. Москва-Сочи, Радио и связь, 2004г. – с. 174 – 177.
88. Лихотин Ю.П., Косенков К.В., Матвеев И.К. Классификация рассредоточенных работ. В кн. Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий. Материалы международной конференции и российской научной школы. Москва-Сочи, Радио и связь, 2004г. – с. 171-174.
89. Лотоцкий В.А. Идентификация структур и параметров систем управления // Измерения. Контроль. Автоматизация. 1991. № 3-4. С.30–38.
90. Лукин Н.П. Роль и место уширения искусственных сооружений в общей системе их воспроизводства. В сб. «Опыт работы по уширению автодорожных мостов» / ЦП ВНТО работников АТ и ДХ. М.: Транспорт, 1989.
91. Матвеев И.К., Семенов П.И., Шмелева Е.Ю. Корпоративное управление: основные проблемы и методы их решения. «Системы автоматизации в обра-

зовании, науке и производстве» 5 Всеросс. научно-практ. конф. Новокузнецк СибГИУ, 2005г. – с. 70-75.

92. Матвеев И.К., Половинкина А.И., Семенов П.И. Модель формирования планов ремонта мостовых сооружений. Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования Материалы мждунар. науч. конфер. Воронеж 2005г. – с. 144.

93. Матвеев И.К., Семенов П.И. Разработка планов ремонта мостовых сооружений. Научный вестник ВГАСУ Н.т. журнал Выпуск №2, 2006г. – с. 78 – 83.

94. Менар К. Экономика организаций. М.: ИНФРА-М, 1996. - 160 с.

95. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. - 344 с.

96. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента. М.: Дело, 1998. - 800 с.

97. Методика определения показателей износа автодорожных мостов / ГП «Росдорнии» (Н.Т.О. по теме НИОКР), ФДД Минтранса России, 1994.

98. Методика технико-экономического обоснования Программы ремонта мостов с определением приоритетности (Контракт BR-FEAC-1 кредит МБРР) / Фирма «Дорис». - М., 1995.

99. Методические рекомендации по содержанию мостовых сооружений на автомобильных дорогах / «Росавтодор». - М., 1999.

100. Мильнер Б.З., Евенко Л.И., Раппопорт В.С. Системный подход к организации управления. М.: Экономика, 1983. - 224 с.

101. Мир управления проектами / Под. ред. Х. Решке, и Х. Шелле. М.: Аланс, 1993. – 304 с.

102. Михин П.В., Потапенко А.М. Приближенное агрегирование линейных моделей в управлении проектами // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. / Тверск. гос. тех. ун-т. – Тверь, 2004. С. 76-79.

103. Михин П.В., Потапенко А.М. Оптимизация календарного плана при ограниченных ресурсах // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. 5-ой междунар. конф. Краснодар, 2004г. С. 74-80.
104. Михин П.В., Потапенко А.М., Семенов П.И. Оптимальное размещение единиц во времени // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/ Тульск. гос. ун-т. – Тула, 2005. С. 100-108.
105. Михин П.В., Потапенко А.М., Семенов П.И. Оптимальное размещение работ между подразделениями проектной организации // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 2/ Тульск. гос. ун-т. – Тула, 2005. С. 108-119.
106. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. - 286 с.
107. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1974. - 526 с.
108. Моррис У. Наука об управлении: Байесовский подход. М.: Мир, 1971.
109. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. М.: Мир, 1991. - 464 с.
110. Национальная программа совершенствования и развития сети автомобильных дорог России на период до 2010 г. «Дороги России 21 века». - М., 2001.
111. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: ИПУ РАН, 1998. – 96 с.
112. Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в моделях активных систем с нечеткой неопределенностью. М.: ИПУ РАН, 1997. - 101 с.
113. Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. М.: Фонд "Проблемы управления", 1999. - 150 с.
114. Новиков Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах. М.: ИПУ РАН, 1998. - 68 с.

115. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНТЕГ, 1999. – 108 с.
116. Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). М.: ИПУ РАН, 1998. - 216 с.
117. Ногин В.Д., Протодяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. – 384 с.
118. Нормы денежных затрат на ремонт и содержание искусственных сооружений. НПО «Росдорнии», концерн «Росавтодор». ЦБНТИ, М., 1992.
119. Нормы денежных затрат на содержание и ремонт мостовых сооружений федеральных дорог (Проект). ГП «Росдорнии», 2001.
120. «О дополнительных мерах по обеспечению сохранности федеральных автомобильных дорог общего пользования». Приказ по РДА от 8.12.1999 г., №284.
121. «О временных мерах по упорядочению проезда по федеральным автомобильным дорогам общего пользования транспортных средств, осуществляющих перевозку грузов в межрегиональных и местном сообщении». Приказ Минтранса РФ от 5.02.2001 г., №21-ДХ.
122. Обеспечение сохранности автомобильных дорог при воздействии транспортных средств. - М., 2001. (Автомоб. дороги: Обзорн. информ. / Информавтодор, вып. 1).
123. Об организации научно-технического сопровождения реализации проектов строительства, реконструкции и ремонта автомобильных дорог и дорожных сооружений. Приказ по Росавтодору №222. - М., 2000 г.
124. ОДН 218.012-99. Общие технические требования к ограждающим устройствам на мостовых сооружениях, расположенных на магистральных автомобильных дорогах. - М.: Информавтодор, 1999.
125. Определение и прогнозирование износа элементов мостовых сооружений на автомобильных дорогах Краснодарского края. Региональные дорожные нормы РДН 218.05.14-2000. - М.: фирма «Верстка», 2001.

126. Орлов А.И. Устойчивость в социально-экономических моделях М.: Наука, 1979. - 218 с.
127. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. - 206 с.
128. Оуэн Г. Теория игр. М.: Мир, 1971. - 230 с.
129. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989. - 367 с.
130. Петраков С.Н. Условия существования эквивалентных прямых механизмов для непрямых механизмов планирования общего вида / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИГУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.
131. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. М.: Высшая школа, 1998. - 304 с.
132. Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ. М.: Наука, 1985. – 424 с.
133. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976. - 344 с.
134. Потапенко А.М. Модели и механизмы перераспределения ресурсов при управлении проектом. В кн. Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, ВГТУ, 2003г. с. 209 – 215.
135. Программа приведения в нормативное состояние федеральных автомобильных дорог общего пользования. / «Росавтодор», 2002. Утв. Росавтодором 19.12.02. - М., 2002.
136. Потапкин А.А. Оценка ресурса мостов с учетом дефектов и повреждений. В сб.: «Повышение надежности строящихся и эксплуатируемых мостов» / г. Павловск (Ленинградская обл.), ДУИЦ, 1996.
137. Потапкин А.А. Оценка ресурса мостов с учетом дефектов и повреждений // Вестник мостостроения (спец. вып.). - М., 1997, №3.

138. Руководство по структуре и организации службы эксплуатации искусственных сооружений на автомобильных дорогах / РосдорНИИ, ФДД Минтранса России. - М., 1994.
139. Скворцов О.В. Техническая политика Федерального дорожного департамента в области мостостроения. В сб. «Повышение надежности строящихся и эксплуатируемых мостов» / г. Павловск (Ленинградская обл.), ДУИЦ, 1996.
140. СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы. / Минстрой России. - М., 1996.
141. Система управления эксплуатацией мостовых сооружений на федеральной сети автомобильных дорог России. М.: Минтранс РФ, 2001. – 73 с.
142. Теория расписаний и вычислительные машины / Под ред. Коффмана Э.Г. -М.: Наука, 1984.
143. А.И. Кочеткова, В.Д. Шапиро, Г.И. Шмаль. М.: ИНСАН, 1992.
144. Уздемир А.П. Динамические целочисленные задачи оптимизации в экономике. – М.: Физматлит, 1995.
145. Управление проектами. Зарубежный опыт / Под. ред. В.Д. Шапиро. С.-Пб.: «ДваТри», 1993. – 443 с.
146. Управление проектами / Общая редакция – В.Д. Шапиро. С.-Пб.: «ДваТри», 1996. – 610 с.
147. Урманов И.А., Горобец Л.И., Шестериков В.И. Формула долговечности или особенности системы управления эксплуатацией мостов // Автомобильные дороги. - 2001, №5.
148. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966. – 276 с.
149. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении М.: Наука, 1991. - 166 с.
150. Шестериков В.И. Анализ состояния мостов на автомобильных дорогах и пути совершенствования мостового хозяйства / Автомоб. дороги: Обзорн. информ. / ЦБНТИ Росавтодора. - М., 1991.
151. Шестириков В.И. Оценка состояния автодорожных мостов и прогнозирование его изменения с помощью показателей физического износа // Автомоб.

дороги: Научно-технические достижения и передовой опыт в обл. авт. дорог: Информ. сб. ЛДНТИ Росавтодора. - М., 1991. - Вып. 5. - С. 1-48.

152. Щетинина Е.Н. Анализ технического состояния мостового парка на основе автоматизированного банка данных. В информационном сборнике «Автомобильные дороги». «Информавтодор», вып. 8, 1999.

153. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. – 688 с.

154. Эткинд Ю.Л. Организация и управление строительством. Свердловск: УГУ, 1991. – 312 с.

155. Янг С. Системное управление организацией. М.: Советское радио, 1982. - 456 с.

156. Abba W.F. Beyond communicating with earned value: managing integrated cost, schedule and technical performance / PMI Symposium. New Orleans, 1995. P. 2 – 6.

157. Arrow K.J. Social choice and individual values. Chicago: Univ. of Chicago, 1951. - 204 p.

158. Badiru A.B. Activity-resource assignment using critical resource diagramming // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 3. P. 15 – 21.

159. Baily M. Wages and employment under uncertain demand // Review of Economic Studies. 1974. Vol. 41. N 125. P. 37 - 50.

160. Barr Z. Earned value analysis: a case study // PM Network. 1996. N 12. P. 31 – 37.

161. Bubshait K.A., Selen W.J. Project characteristics that influence the implementation of Project Management techniques: a survey // International Journal of Project Management. 1992. Vol. 23. N 2. P. 43 – 47.

162. Burkov V.N. Problems of optimal distribution of resources // Control and Cybernetics. 1972. Vol. 1. N. 1/2.

163. Buttle T. A Hitchhiker's guide to Project Management / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 89 – 97.

164. Christensen D.S. A review of cost/schedule control systems criteria literature // *International Journal of Project Management*. 1994. Vol. 25. N 3. P. 32 – 39.
165. Coleman J.H. Using cumulative event curves on automotive programs / *PMI Symposium*. Pittsburgh, 1992. P. 101 – 107.
166. Connely A. Ad-hoc hierarchies for flat-flexible organizations / *PMI Symposium*. Pittsburgh, 1992. P. 329 – 335.
167. Dasgupta P., Hammond P., Maskin E. The implementation of social choice rules: some general results on incentive compatibility // *Review of Economic Studies*. 1979. Vol. 46. № 2. P. 185 - 216.
168. Devaux S.A. When the DIPP dips // *International Journal of Project Management*. 1992. Vol. 22. N 3. P. 45. – 49.
169. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. *Earned value Project Management*. PMI, 1996. – 141 p.
170. Gilyutin I. Using Project Management in a nonlinear environment // *International Journal of Project Management*. 1993. Vol. 24. N 4. P. 20 – 26.
171. Globerson S. *Effective Management of Project process* / *PMI Symposium*. New Orleans, 1995. P. 381 - 387.
172. Grossman S., Hart O. An analysis of the principal-agent problem // *Econometrica*. 1983. Vol. 51. N 1. P. 7 - 45.
173. Groves T., Radner R. The allocation of resources in a team // *Journal of Economic Theory*. 1972. Vol. 4. N 2. P. 415 - 441.
174. Hart O.D. Optimal labor contracts under asymmetric information: an introduction // *Review of Economic Studies*. 1983. Vol. 50. N 1. P. 3 - 35.
175. Hatfield M.A. Managing to the corner cube: three-dimensional Management in a three-dimensional world // *International Journal of Project Management*. 1995. Vol. 26. N 1. P. 13 – 20.
176. Hurwicz L. *On informationally decentralized systems* / *Decision and organization*. Amsterdam: North-Holland Press, 1972. P. 297 - 336.

177. Hatfield M.A. The case for earned value // PM Network. 1996. N 12. P. 25 – 27.
178. Ingram T. Client/Server: Imaging and earned value: a success story / PM Network. 1995. N 12. P. 21 – 25.
179. Marchak J., Radner R. Economic theory of teams. New Haven - London: Yale Univ. Press, 1976. - 345 p.
180. Matsuura N., Yonts M.G. Monitoring and rewarding multiple projects using a weighted performance index in a performance-based contract / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 142 – 146.
181. Myerson R.B. Game theory: analysis of conflict. London: Harvard Univ. Press, 1991. - 568 p.
182. N. Lukin. Servicable condition of Highway Bridges. Transportation Infrastructure. NATO ASI Series. 1996.
183. Newell M. Estimating techniques that will revolutionize your projects / PMI Symposium. Boston, 1996. P. 1 – 5.
184. Peters T.J., Watermann R.H. In search of excellence. NY: H&R, 1982. - 360 p.
185. Robinson P.B. The performance measurement baseline – a statistical view // PM Network. 1997. N 6. P. 47 – 52.
186. Singh A. A taxonomy of practical Project cost forecasting techniques / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 198 – 204.
187. Singletary N. What's the value of earned value // PM Network. 1996. № 12. P. 28 – 30.
188. Taylor F.W. The principles of scientific Management / Vroom V.H. Industrial social psychology / The Handbook of Social Psychology. Vol. 5. N.Y.: Addison-Wesley, 1969. P. 200 - 208.
189. Wilkens T.T. Earned value: clear and simple / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 54 – 60.

ПРИЛОЖЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Управления автомобильной магистрали Москва - Архангельск



А.Н. Макаров
19 июня 2006 г.

АКТ

“ 19 июня 2006 г.”

г. Вологда

О результатах внедрения законченной научно-исследовательской работы по разработке методических рекомендаций по выбору вариантов содержания мостовых сооружений

В период с 27 февраля 2006 г. по 16 июня 2006 г. в ГУ «Управление автомобильной магистрали Москва – Архангельск» (Упрдор «Холмогоры») проводилась научно-исследовательская работа по совершенствованию процесса содержания мостовых сооружений.

Результатом работы явилась разработка ряда методических материалов по созданию и практическому использованию моделей выбора вариантов содержания мостов с использованием методов исследования операций.

В их числе:

1. Модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов, позволяющая определять наиболее рациональные варианты содержания мостовых сооружений.

2. Модель получения множества Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.

Результаты работы получили поддержку и одобрение на заседаниях технического совета.

Начальник отдела искусственных сооружений

В.Н. Полуэктов

Акт

О результатах внедрения законченной научно-исследовательской работы по разработке методических рекомендаций по совершенствованию процесса планирования ремонтных работ и выбору вариантов содержания мостовых сооружений

В период 2001-2006 годов проводилась научно-исследовательская работа по совершенствованию процедуры планирования ремонтных работ и разработке методических материалов по использованию моделей выбора вариантов содержания мостовых сооружений.

Вопросы данной научно-исследовательской работы, разработанной Матвеевым Игорем Константиновичем, а именно:

1. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба, позволяющая обеспечить наиболее эффективное распределение ограниченных финансовых ресурсов.
2. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов, дающая возможность эффективного распределения финансовых ресурсов при перспективном планировании на несколько временных периодов.
3. Модель определения оптимальных вариантов содержания мостовых сооружений для группы мостов, позволяющая определить наиболее рациональные варианты содержания мостовых сооружений.
4. Модель получения множества Парето-оптимальных решений, обеспечивающих эффективное формирование стратегии по содержанию мостовых сооружений по критериям долговечности и величины совокупных затрат.

Были применены в ниже перечисленных отраслевых нормативных и методических документах Федерального дорожного агентства (Росавтодор), которые применяются Управлением эксплуатации и сохранности автомобильных дорог Росавтодора и подведомственными организациями при своей производственной деятельности:

1. Методические рекомендации по содержанию мостовых сооружений на автомобильных дорогах. 2002 г.
2. Временное руководство по организации освоения инноваций при проектировании, строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог и сооружений на них. 2003 г.
3. Программа совершенствования Системы управления эксплуатацией мостовых сооружений до 2010 г. 2005 г.
4. Разработка ОДН. Нормы износа и сроков службы мостовых сооружений на автомобильных дорогах. 2004 г.

Заместитель начальника Управления
эксплуатации и сохранности автомо-
бильных дорог



С.А. Беляков

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ГУ

Федеральное управление

автомобильных дорог

«Черноземье»

Говоров В.В.



АКТ

“ 15 июля 2006 г.”

г. Воронеж

О результатах внедрения законченной научно-исследовательской работы по разработке методических рекомендаций по совершенствованию процесса планирования ремонтных работ по содержанию мостовых сооружений

В период с 5 апреля 2006 г. по 15 июля 2006 г. в Федеральном управлении автомобильных дорог «Черноземье» Матвеевым И.К. проводилась научно-исследовательская работа по совершенствованию процедуры планирования ремонтных работ на мостах и других искусственных сооружениях. В результате был разработан ряд методических материалов по созданию и практическому использованию моделей и методов решения поставленных задач.

В их числе:

1. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации ущерба, позволяющая обеспечить наиболее эффективное распределение ограниченных финансовых ресурсов.
2. Модель формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений для нескольких плановых периодов, дающая возможность эффективного распределения финансовых ресурсов при перспективном планировании на несколько временных периодов.
3. Приближенный алгоритм решения задачи формирования плана ремонтных работ мостовых сооружений при условии минимизации значения ущерба.

Результаты работ получили поддержку и одобрение на заседаниях технического совета Федерального управления автомобильных дорог «Черноземье».

Начальник отдела мостов
и искусственных сооружений

Резванцева И.И