

УДК 629.432

**М. Ю. Розов**Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I**М. Н. Закс**

ОАО «НИИ вагоностроения»

## ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИИ КОНСОЛЬНОЙ ЧАСТИ РАМЫ КУЗОВА ВАГОНА МЕТРОПОЛИТЕНА 81 СЕРИИ

В статье даны обзор и анализ существующих конструкций кузовов вагонов Петербургского метрополитена. Рассматриваются текущее состояние кузовов вагонов метрополитена и мероприятия, направленные на увеличение срока их службы. Описана методика прочностного расчета рамы кузова вагона с применением метода конечных элементов. Приведены результаты прочностного расчета рамы кузова вагона и их анализ, который позволил выбрать наиболее рациональный вариант исполнения конструкции консольной части рамы кузова и установить целесообразность применения усиливающих раскосов.

кузов вагона, метрополитен, срок службы, шкворневые балки, хребтовые балки.

### Введение

На Петербургском метрополитене эксплуатируются несколько модификаций подвижного состава, рамы кузова которых имеют существенные различия.

### 1 Текущее состояние кузовов вагонов метрополитена

В вагонах модели «Е» и «Ем» [1] (эксплуатируются на Петербургском метрополитене с начала 1960-х годов) консольная часть рамы кузова состоит из шкворневой балки, которая опирается непосредственно на тележку, раскосой Z-образной хребтовой балки, к которой крепится ударно-тяговый аппарат автосцепного устройства, и боковой продольной балки (рис. 1).

При такой конфигурации консольной части рамы кузова продольные усилия от автосцепного устройства практически передаются на боковые продольные балки, не вызывая дополнительного изгиба шкворневой балки.

Недостатком данной конструкции является отсутствие достаточной жесткости раскосой

Z-образной балки: за период эксплуатации происходили потери устойчивости элементов консольной части рамы и пластические деформации раскосой Z-образной балки.

В вагонах 81 серии (эксплуатируются на Петербургском метрополитене с конца 1970-х годов) консольные части рамы кузова имеют другую конструкцию (рис. 2а): из шкворневой балки, боковых продольных балок и прямой хребтовой балки, которая представляет собой два швеллера с сечением 180×70×6 мм [1]. В средней части на нижних (горизонтальных) полках швеллера установлены две косынки, с которым соединяется узел крепления ударно-тягового аппарата автосцепки.

Такое исполнение балок позволило исключить потери устойчивости элементов консольной части рамы и пластические деформации хребтовых балок. Однако в процессе эксплуатации выявились «слабые» зоны этой конструкции консольной части рамы. В зоне окончания приварки флангового сварного шва, соединяющего продольное вертикальное ребро узла крепления ударно-тягового аппарата автосцепки с нижней полкой швеллера хребтовой балки, из-за высокой концентрации напряжений появляются усталостные трещи-

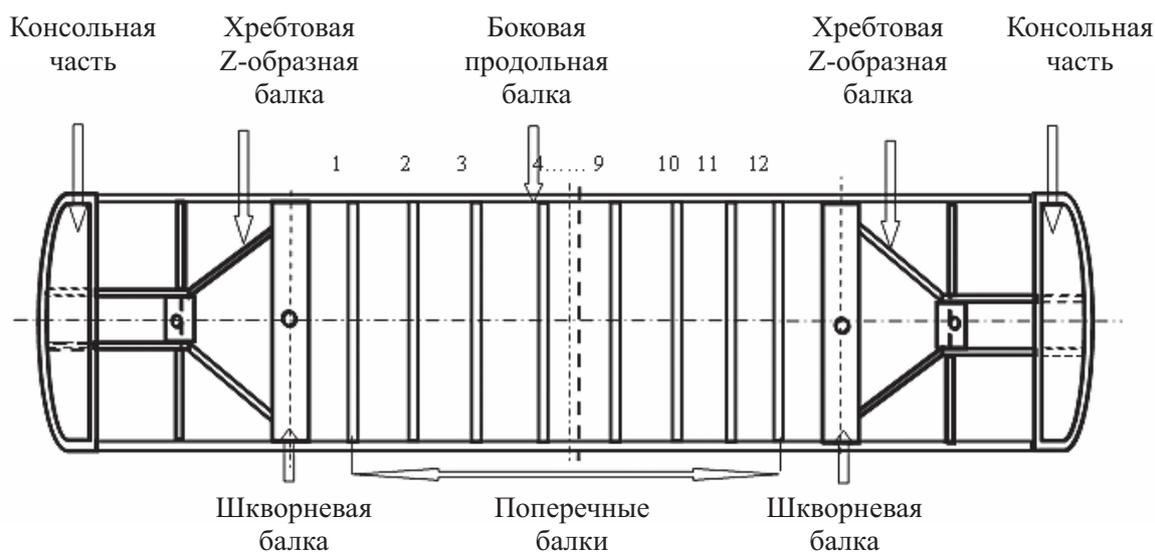
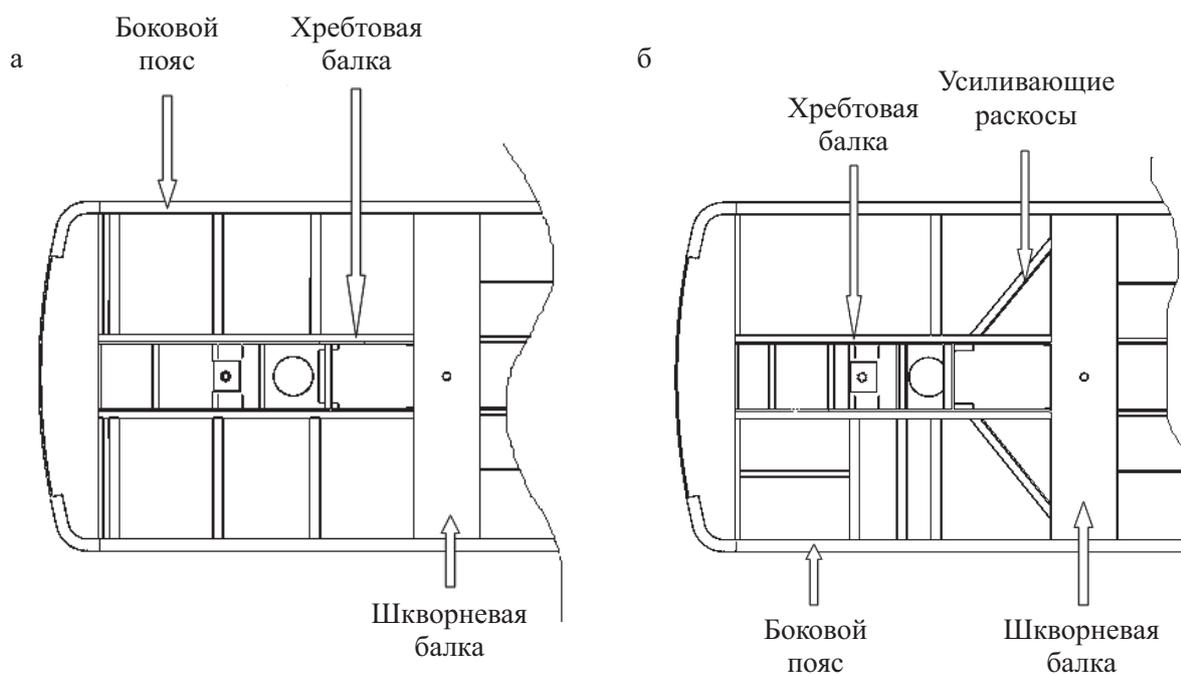


Рис. 1. Общий вид рамы кузова вагона метрополитена серии E, Em

Рис. 2. Общий вид концевой части рамы кузова вагона метрополитена 81 серии:  
а) без усиливающих раскосов; б) с усиливающими раскосами

ны. Также выявлены места трещинообразования на вертикальных листах шкворневых балок.

Заводы – изготовители вагонов метрополитена разработали варианты усиления консольной части рамы кузова за счет установки рас-

косов (рис. 2б). Предполагалось, что установка раскосов обеспечит более распределенную передачу продольных усилий на шкворневую балку и позволит исключить трещинообразование на вертикальных листах шкворневых балок. При этом использованы два варианта

технологического соединения раскоса с хребтовой балкой: раскос проходит внутрь швеллера балки либо приваривается к торцам полок швеллера. При втором варианте установки раскосов в нижней полке швеллера возникает повышенный уровень концентрации напряжений (результаты расчетов приведены ниже).

При проведении капитального ремонта вагонов 81 серии в Петербургском метрополитене производится усиление консольной части рамы кузова, которое включает в себя установку шкворневой балки с толщиной вертикальных листов 10 мм, горизонтальных – 12 мм (вместо шкворневых балок с толщиной вертикальных листов 6 (8) мм и толщиной горизонтальных листов 8 (10) мм), а также хребтовых балок с технологическими улучшениями (рис. 3).

Кроме того, устанавливаются раскосы. Такая конструкция консольной части рамы применена и в последних вагонах 81 серии.

## 2 Расчет рамы кузова на прочность

Для анализа различных конструкций консольной части рамы кузова вагонов 81 серии были проведены сравнительные прочностные расчеты трех вариантов расчетных моделей:

1) шкворневая балка с толщиной горизонтальных листов 8 мм, вертикальных – 6 мм (серийное исполнение) (рис. 2а);

2) шкворневая балка с толщиной горизонтальных листов 12 мм, вертикальных – 10 мм (рис. 2а);

3) шкворневая балка с толщиной горизонтальных листов 12 мм, вертикальных – 10 мм с раскосами (рис. 2б).

Кузов вагона метрополитена опирается на две тележки через пятниковый узел. Брутто кузова вагона 81 серии 392,4 кН (40 тс). Принимается, что вся вертикальная нагрузка от брутто кузова равномерно распределена по площади пола.

Кроме вертикальной нагрузки в расчете учитываются продольные силы, действующие в зоне крепления автосцепки. Величина этих сил 0,5 МН (50 тс) для I расчетного режима и 0,12 МН (12 тс) для II расчетного режима [2].

Общий вид распределения нагрузки на раму кузова представлен на рис. 4. В квадратах показана величина вертикальных сил, действующих на раму.

При расчете приняты следующие допущения:

1. Вертикальная жесткость кузова (стенок кузова) значительно превышает вертикальную жесткость боковых поясов рамы кузова. Условно принимаем жесткость боковых поясов равной жесткости стенок кузова, так как в расчете не определяется прочность бокового пояса рамы кузова;

2. Рама кузова шарнирно опирается на тележку через пятник;

3. Влияние гофрированного пола на жесткость и прочность элементов рамы не учитывалось;

4. Нагрузка от пола равномерно передается на поперечные и продольные элементы рамы кузова вагона по упомянутой выше схеме;

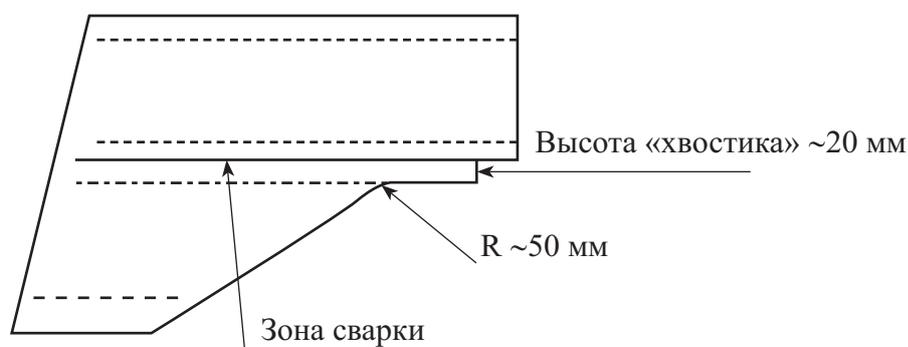


Рис. 3. Зона перехода ребра к швеллеру продольной балки

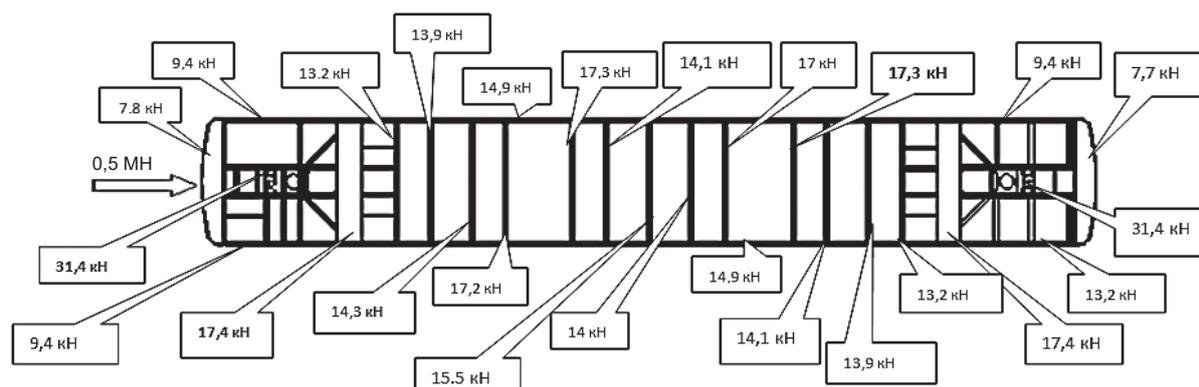


Рис. 4. Общий вид распределения нагрузки на раму кузова

5. Влияние средней части рамы кузова на прочность и жесткость концевой части рамы не учитывается;

6. Продольные нагрузки от автосцепки прикладывались в зоне крепления водила автосцепки (с левой стороны приложена сила 0,5 МН, с правой стороны введено перемещение от продольного перемещения).

Рама кузова была смоделирована в виде твердотельных элементов в программном пакете проектирования и рассчитана по методу конечных элементов [3]. Для учета жесткости боковой стенки кузова была смоделирована часть кузова (до уровня окон). Общее количество конечных элементов (для исходного варианта) составило 948 580, узлов – 1 890 222. На модель наносилась конечно-элементная сетка с элементами типа десятиузловой треугольной пирамиды с максимальной величиной ребра:

- для средней части рамы кузова – 50 мм;
- концевой – 25 мм;
- вертикальных листов шкворневых балок в зонах с высоким градиентом напряжений – 10 мм.

Граничные условия в пятниковом узле (рис. 5), ограничивают перемещение кузова в вертикальном и поперечном направлениях ( $X = 0$ ;  $Y = 0$ ).

Узел крепления автосцепки к раме кузова одной из хребтовых балок был закреплен для предотвращения продольного перемещения ( $Z = 0$ ).

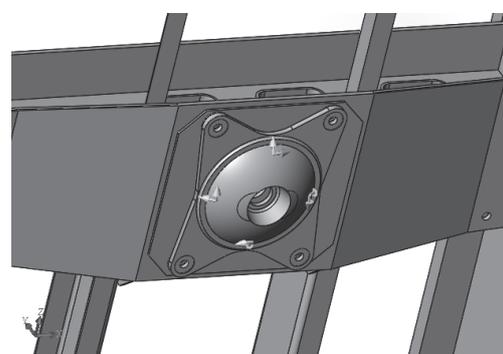


Рис. 5. Схема закрепления рамы кузова в пятниковом узле

Оценка результатов прочностного расчета производилась по 10 контрольным точкам (зонам) на шкворневой и хребтовой балке, в месте соединения раскосов с хребтовой балкой (рис. 6). Напряжения в стенках шкворневой балки определялись около армировки на расстоянии 15 мм от сварного шва.

### 3 Анализ результатов расчета

В табл. 1 приведены результаты прочностного расчета для I расчетного режима. Расчеты производились отдельно от вертикальной нагрузки (В), от продольной силы (П) и от совместного действия вертикальной и продольной нагрузок (В + П).

Приведенные эквивалентные расчётные напряжения учитывают концентрацию напряжений в узловых элементах конструкции.

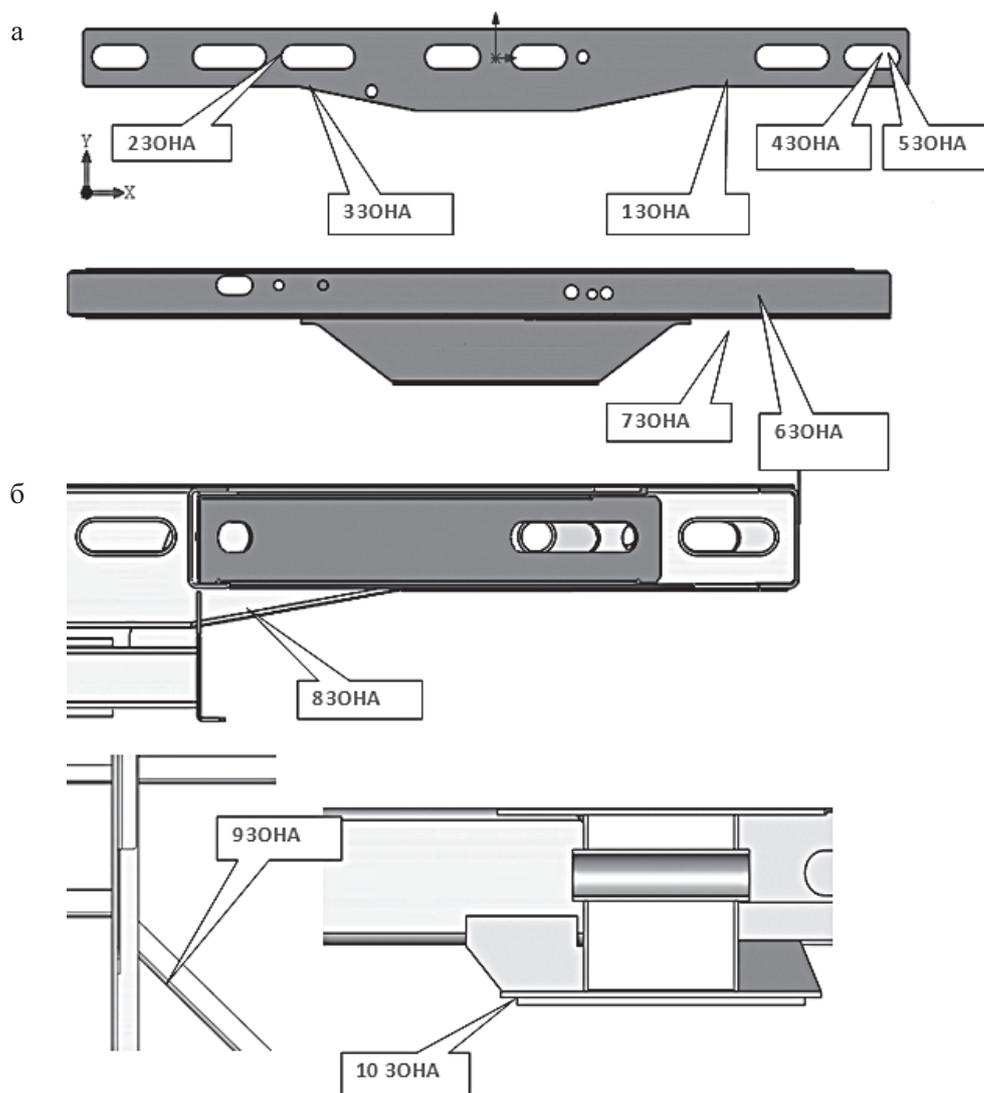


Рис. 6. Схема контрольных точек (зон):  
а) шкворневая балка; б) хребтовая балка

Анализ данных табл. 1 показывает, что в «усиленном» варианте шкворневой балки уровень напряжений снизился по сравнению с серийной шкворневой балкой (вариант 1) в 1,2–1,6 раза. Такое снижение уровня напряжений повысит долговечность балки минимум в два раза, что позволит существенно продлить срок службы кузова серийного вагона [4].

Применение в раме кузова более жесткой шкворневой балки приводит к некоторому повышению напряжений в хребтовой балке от продольных усилий.

Введение раскосов практически не снижает уровня напряжения в шкворневой и хребтовой балках.

Так как приварка раскосов к хребтовой и шкворневой балке позволяет повысить концентрацию напряжений и, соответственно, снизить сопротивление усталости в этих зонах продольной и шкворневой балки, целесообразно не вводить раскосы в данную конструкцию концевой части рамы кузова.

Для оценки прочности «усиленного» варианта концевой части рамы кузова (без при-

ТАБЛИЦА 1 Значения эквивалентных напряжений расчетных моделей, МПа

№ точки	1 вариант			2 вариант			3 вариант		
	В	П	В + П	В	П	В + П	В	П	В + П
1	95	175	270	80	140	220	85	135	220
2	135	185	315	90	140	220	90	140	220
3	95	175	270	80	140	220	80	140	220
4	175	150	320	110	110	210	110	115	215
5	190	170	355	115	115	220	115	115	220
6	5	130	130	5	145	150	5	150	150
7	~ 0	290	290	~ 0	310	310	~ 0	310	310
8	10	275	285	15	315	330	15	315	330
9	–	–	–	–	–	–	~ 0	30	30
10	60	230	285	60	290	350	65	300	360

ТАБЛИЦА 2 Значения напряжений в шкворневой и хребтовой балке (вариант 2) при эксплуатационном режиме (II режим), МПа

Напряжение	№ точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	
Вертикальная нагрузка, $V \cdot K_d$	92	103	92	126	132	6	~ 0	17	70	
Продольная нагрузка, П	34	34	34	27	28	35	74	75	70	
Суммарное напряжение	126	137	126	153	160	41	75	92	140	

менения раскосов) был произведен расчет по II (эксплуатационному) режиму [2], где вертикальная нагрузка определяется исходя из массы брутто кузова, умноженной на максимальный коэффициент вертикальной динамики,  $K_d = 1,15$  [2], а продольная сила равна 0,12 МН (12 тс) [4]. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Согласно действующим нормам [2], при эксплуатационном режиме для шкворневой и

хребтовой балки рамы кузова, изготовленных из стали 20 (Ст3 сп), допустимы напряжения  $[\sigma] = 160$  МПа.

Результаты расчета показали, что суммарное напряжение во всех исследованных зонах шкворневой и хребтовой балки не превышает допустимых:  $\sigma_{\text{МАК}} < [\sigma] = 160$  МПа.

Рекомендации данной работы были использованы на Петербургском метрополитене.

## Заключение

1. Отработана методика прочностного расчета рамы кузова вагона метрополитена 81 серии. Примененный пакет программного проектирования позволил создать объёмную конечно-элементную модель рамы кузова и по методу конечных элементов в программном продукте провести многовариантный анализ расчетов с учетом всех нормированных нагрузок.

2. Анализ полученного напряженного состояния несущих элементов рамы кузова позволил выбрать рациональную конструкцию консольной части рамы и установить целесообразность применения усиливающих раскосов.

## Библиографический список

1. **Электропоезда метрополитена** / Э.М. Добровольская. – Москва : ИРПО ; Академия, 2003. – 320 с.

2. **Нормы** для расчета и проектирования механической части новых и модернизированных вагонов метрополитенов СССР колеи 1520 мм. – Москва : ВНИИВ-ВНИИЖТ-ММЗ, 1987.

3. **Применение** метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва : Мир, 1979. – 392 с.

4. **Расчет** на прочность рамы кузова вагона метрополитена модели 81-717/714. – Москва : ОАО «НИИ вагоностроения», 2014.

УДК 629.052.3

## Е. В. Соболев, Ал-Рубой Мудар, Е. А. Рубцов

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОКРЫТИЯ ВОЗДУШНЫХ ТРАСС РЕСПУБЛИКИ ИРАК РАБОЧИМИ ОБЛАСТЯМИ РАДИОМАЯКОВ VOR/DME

Покрытие воздушных трасс зонами действия радиотехнических средств навигации является необходимым условием обеспечения безопасности полетов. Достаточным же условием является покрытие воздушных трасс рабочими областями, что позволяет обеспечить требуемую точность и безопасность полетов.

В статье выполнен расчет степени покрытия выбранных трасс рабочими областями маяков VOR/DME, который выявил протяженные участки трасс, где не соблюдаются требования к точности определения координат ВС. Рекомендовано внедрить дополнительные навигационные маяки. Расчет, выполненный с учетом рекомендаций, показал, что в этом случае протяженность непокрытых участков уменьшится от 2,2 до 2,7 раз в зависимости от высоты полета.

рабочая область, VOR/DME, RNP, зональная навигация.

## Введение

Рост объемов воздушных перевозок в Республике Ирак обуславливает необходимость повышения пропускной способности воздушного пространства и его оптимального использования с учетом возрастающих требований к безопасности полетов.

В работе [1] были определены зоны действия существующих маяков VOR/DME, расположенных на территории Республики Ирак и вдоль границы страны, а также даны рекомендации по внедрению дополнительных маяков. Рекомендации позволяют добиться полного покрытия воздушных трасс зонами действия РТС-навигации. Данное обстоятель-