

# Выбор оптимального варианта развития Улан-Баторской железной дороги



Александр БАТУРИН  
Alexander P. BATURIN

Мунхдэлгэр БАЛЖИР  
Munkhdelger BALJIR



*Батурин Александр Павлович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.  
Балжир Мунхдэлгэр – аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» МИИТ, Улан-Батор, Монголия.*

## Selection of Optimal Variants for Ulaan-Baatar Railway Development

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 160)

**В связи с непрерывным ростом грузопотока на Улан-Баторской железной дороге возникают задачи, связанные с выбором и экономическим обоснованием ее технического оснащения на перспективу. Для их решения требуется проанализировать условия модернизации, усиления провозной (перерабатывающей) способности участков (станций), выбрать схемы этапного развития и оптимизации технического оснащения линий АО «УБЖД».**

Ключевые слова: железная дорога, грузопоток, полуавтоблокировка, автоблокировка, провозная способность, перерабатывающая способность, развитие участков, граф вариантов, срок исчерпания, АО «УБЖД».

Современные однопутные линии позволяют осваивать грузопоток до 16–18 млн тонн нетто в год в одном направлении. Однако при значительных грузопотоках резко увеличиваются задержки поездов. Это приводит к снижению участковой скорости, ухудшает показатели использования подвижного состава, вызывает дополнительные потери топлива и в конечном итоге повышает себестоимость перевозок, снижает производительность труда [1–3]. Затем наступает момент, когда один путь не может уже освоить возросший грузопоток и возникает потребность в усилении провозной способности [4]. При этом расчетные пропускные и провозные мощности коммуникаций транспортных узлов, а также приоритетные направления наращивания инфраструктуры увязываются с долгосрочными перспективами развития производительных сил, регионов, внешней торговли [5, 6].

В аналогичной ситуации анализ существующих характеристик линий Улан-Баторской железной дороги показал, что для нее возможны следующие меры по увеличению провозной способности:

Характеристика состояний участка Сайншанд–Дзамын–Удэ

пп/п	Техническое состояние участка
C <sub>1</sub>	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м (исходное состояние)
C <sub>2</sub>	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ), постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м
C <sub>3</sub>	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м
C <sub>4</sub>	Однопутная линия, постройка семи дополнительных раздельных пунктов, оборудована автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м
C <sub>5</sub>	Однопутная линия, постройка семи дополнительных раздельных пунктов, оборудована автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м
C <sub>6</sub>	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м
C <sub>7</sub>	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м
C <sub>8</sub>	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м
C <sub>9</sub>	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м

• Строительство дополнительных развязок для уменьшения расстояния между раздельными пунктами.

• Удлинение станционных приемо-отправочных путей с 850 до 1050 метров.

• Оборудование линии автоблокировкой.

• Строительство второго главного пути как завершающая стадия поэтапного увеличения провозного ресурса участков дороги.

В зависимости от условий работы линии указанные варианты усиления пропускной и провозной способности могут быть применены в различных сочетаниях их последовательного осуществления [7]. В каждом отдельном случае имеется вполне определенная оптимальная очередность проведения мероприятий, а также наиболее целесообразное рассредоточение по техническим срокам, при которых общие перевозочные затраты за весь период эксплуатации линии вплоть до переустройства ее в двухпутную будут наименьшими.

Развитие участков и линий предполагается поэтапное. Авторами использована методика выбора множества возможных состояний технического оснащения железнодорожной линии [7]. Подробную характеристику этому процессу можно дать с помощью понятий вектора состояния и этапа развития участка. Набор параметров, которые характеризуют техническое оснащение, управление и технологию работы, называется состоянием участка.

Для тех или иных участков всегда есть некоторое множество состояний. Оно обо-

значается символом  $S$ , а его элементы (вектор состояния) –  $s_i$ . Необходимо определить множество состояний  $S$ , которое будет служить исходным материалом для построения схем развития участков, и далее найти множество конкурентоспособных схем  $S$ .

Однопутная железнодорожная линия Сухэ–Батор–Дзамын–Удэ оборудована полуавтоматической блокировкой. На линии имеются пять участков.

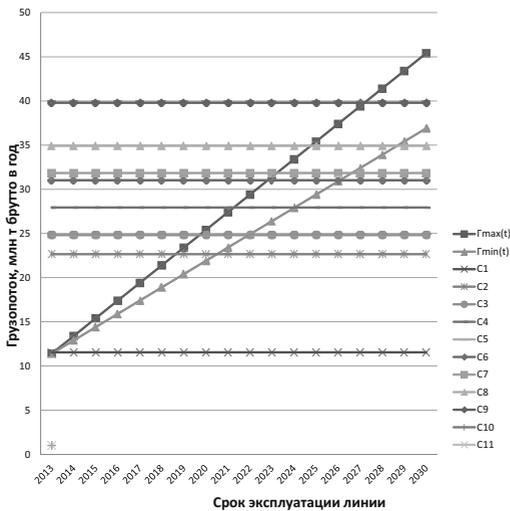
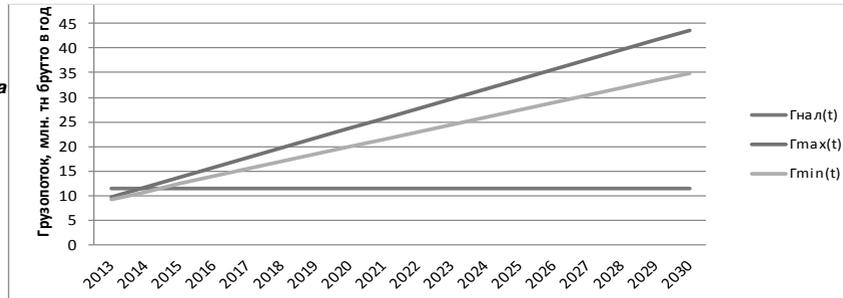
Возьмем, к примеру, участок № 5: Сайншанд–Дзамын–Удэ. Протяженность его 235 км. На нем 10 раздельных пунктов и две технических станции. Средняя длина перегона – 23 км. Средняя полезная длина раздельных пунктов – 850 м. Ограничивающим является перегон Тушлэг–Оргон, где время хода составляет 47 минут. Средний вес поезда в четном направлении – 3981 т брутто, а в нечетном – 2316 т брутто. Характеристика возможных состояний на период до 15 лет для этого участка представлена в таблице 1. Эти состояния учитываются при построении схем развития линии. По заданному множеству  $S_i$  следует перечислить все возможные конкурентоспособные схемы развития.

Определение технического срока – задача, которая решается для каждого участка и каждого состояния его развития. Срок исчерпания провозной способности – технический срок реконструкции определяется из условия равенства наличной и потребной провозной способности (интенсивности грузопотока) [7].





**Рис. 1. Диаграмма наличной и потребной провозной способности на участке Сайншанд–Дзамын-Удэ.**



**Рис. 2. Многоэтапная схема увеличения провозной способности участка Сайншанд–Дзамын-Удэ.**

Зная наличную и потребную провозную способность линии для каждого года  $t$ , можно построить график их изменения во времени. Строят график  $\Gamma_n(t)$  – потребной провозной способности, задавая значения грузопотока по пятилетним периодам, т. е. для 5, 10, 15 и 20 года.

Аналогичным образом находят технические сроки реконструкции для состояний  $C_1, \dots, C_{11}$  (см. таблицу 1) по каждому участку в четном и нечетном направлениях. Состояния участков упорядочиваются по срокам реконструкции, поэтому, зная такие технические сроки ( $t_{\text{тех}}^i, \dots, t_{\text{тех}}^j$ ), получим:  $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_5 \rightarrow C_6 \rightarrow C_7 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$ . Итоги расчетов, где упорядочены состояния по срокам реконструкции, приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что технический срок реконструкции участка в исходном состоянии (однопутная линия, ПАБ,  $L_{\text{поп}} = 850$  м) в четном направлении практически исчерпан. Это свидетельствует о существенном темпе роста грузопотока.

В качестве технических сроков реконструкции участка из четного и нечетного направлений в расчете принимается срок, имеющий наименьшее значение (в таблице эти сроки показаны жирным шрифтом). Ориентируясь на технические сроки реконструкции, для каждого состояния можно построить многоэтапную схему увеличения провозной способности, которая продемонстрирована на рис. 2 для участка Сайншанд–Дзамын-Удэ.

Увеличение перевозочной мощности железнодорожной линии по выбранной схеме развития осуществляется поэтапно, при этом каждый этап может характеризоваться одним или несколькими параметрами технической оснащенности. В нашем случае при оборудовании линии автоблокировкой с организацией частично-пакетного движения такими параметрами являются коэффициент пакетности графика  $\gamma_{\text{пак}}$  и стандарт длины станционных приемо-отправочных путей  $L_{\text{ст}}$ .

Техническая реконструкция линии позволяет не только существенно увеличить ее провозную способность, но и резко уменьшить перевозочные затраты. Поэтому моменты реконструкции линии должны обосновываться технико-экономическими расчетами [4].

Для выбора множества конкурентоспособных схем надо определить множество логически противоречивых состояний. Такими состояниями являются, например,  $C_3$  и  $C_5$  – противоречие в том, что на третьем этапе участок оборудуется автоблокировкой с коэффициентом пакетности  $\gamma_{\text{пак}} = 0$ , а на пятом этапе – полуавтоблокировкой. Подобных противоречивых пар на данном участке десять.

Необходимая информация для построения графа вариантов конкурентоспособных схем в соответствии с методикой [7]

определена. На рис. 3 показан полный граф вариантов для участка № 5. На графе имеется 43 схемы с начальным состоянием  $C_1$  и конечным  $C_{11}$ . В таблице 3 приведен полный перечень конкурентоспособных вариантов.

При определении оптимального срока реконструкции используется алгоритм дифференциальных оценок [7].

В общем случае рассматривается каждое состояние технической оснащенности объекта начиная с первого этапа. Для каждого состояния  $C_i$  проверяется оптимальность сроков реконструкции линии при  $t=0$  и при  $t=t_{\text{тех}}^i$ .

В точке  $t_{\text{тех}}^i$  срок реконструкции будет оптимальным, если выполняется неравенство

$$E_i(t_{\text{тех}}^i) - E_{i+1}(t_{\text{тех}}^i) - E_n \cdot K_i(t_{\text{тех}}^i) \leq 0, \quad (1)$$

где  $E_n$  – величина, обратная сроку окупаемости.

В точке  $t=0$  срок реконструкции оптимален, если выполняется неравенство

$$E_i(0) - E_{i+1}(0) - E_n \cdot K_i \leq 0. \quad (2)$$

А если эти два неравенства не выполняются, то оптимальный срок реконструкции находится в интервале  $0 \leq x_i \leq t_i^s$  и следует из уравнения

$$E_i(x_i) - E_{i+1}(x_i) - E_n \cdot K_i = 0. \quad (3)$$

Аналогичным образом устраняется невыполнение ограничений по всем состояниям в схеме, поскольку число таких корректировок также конечно.

На основе изложенного алгоритма и используя технико-экономические параметры, представленные в таблице 4, определяются оптимальный срок развития участка.

По итогам расчёта получим график оптимального развития технического оснащения участка (рис. 4). Из него следует, что оптимальное развитие технического оснащения на участке Сайншанд–Дзамын-Удэ обеспечивается схемой № 16. Получается, что к концу 2015 года здесь необходимо построить семь отдельных пунктов и удлинить приемо-отправочные пути до 1050 м. При таком техническом оснащении линия должна эксплуатироваться до 2023 года. Кроме того, к концу 2022 года на участке предстоит оборудовать автоблокировку с коэффициентом пакетно-

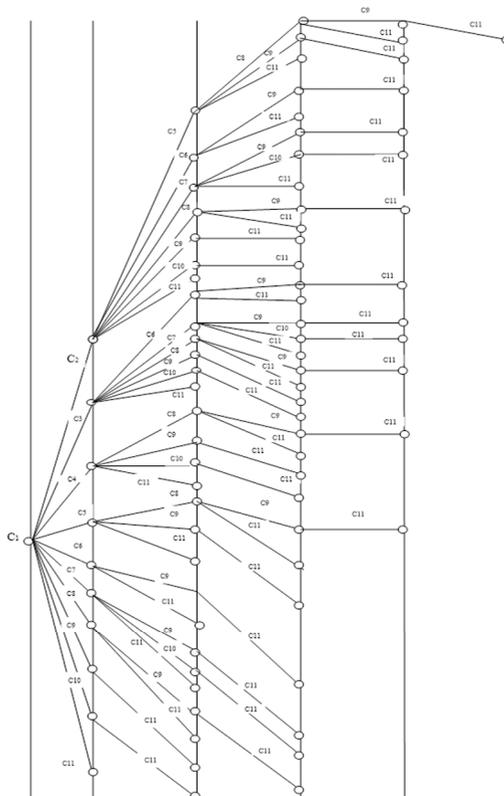


Рис. 3. Граф вариантов конкурентоспособных схем развития железнодорожной линии для участка Сайншанд–Дзамын-Удэ.

сти 0,6. Это продлит эксплуатацию линии до 2028 года. Дальше, при интенсивном росте грузопотока, есть основания рассмотреть переход к сплошному второму главному пути.

## Выводы

В результате исследования применительно к условиям монгольских железных дорог есть основания заключить:

1. Анализ технического оснащения и перспективных объемов перевозок позволил определить мероприятия по увеличению пропускной и провозной способности участков. К их числу относятся:

- строительство дополнительных развязок для уменьшения расстояния между отдельными пунктами;
- удлинение станционных приемо-отправочных путей с 850 до 1050 метров;
- оборудование линии автоблокировкой.

2. Для каждого участка было разработано порядка трёх-четырёх десятков схем

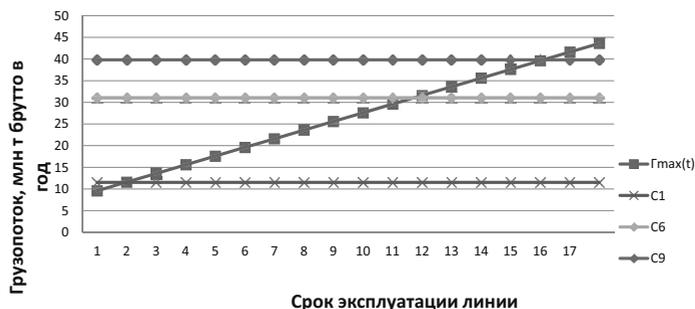


Технический срок реконструкции

Состояние участка	Характеристика технического состояния участка	Направление	Технический срок эксплуатации				
			Участок № 1	Участок № 2	Участок № 3	Участок № 4	Участок № 5
C1	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ), построена семи дополнительных раздельных путей Lст=850 м	Чет	2015	2016	2015	2013	2014
		Нечет	>2030	>2030	2015	2013	2015
C2	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ), построена семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м	Чет	2019	2018	2022	2020	2019
		Нечет	>2030	>2030	2022	2018	2021
C3	Однопутная линия, построена семи дополнительных раздельных пунктов, оборудована автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м	Чет	2019	2018	2022	2020	2020
		Нечет	>2030	>2030	2022	2019	2022
C4	Однопутная линия, построена семи дополнительных раздельных пунктов, оборудована автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м	Чет	2021	2019	2024	2022	2021
		Нечет	>2030	>2030	2022	2020	2023
C5	Однопутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ), построена семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м	Чет	2022	2020	2026	2023	2023
		Нечет	>2030	>2030	2025	2021	2025
C6	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м	Чет	2022	2020	2026	2023	2023
		Нечет	>2030	>2030	2025	2021	2025
C7	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м	Чет	2023	2021	2026	2024	2023
		Нечет	>2030	>2030	2025	2021	2025
C8	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м	Чет	2024	2022	2028	2025	2025
		Нечет	>2030	>2030	2027	2022	2027
C9	Однопутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Постройка семи дополнительных раздельных пунктов. Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м	Чет	2027	2024	2030	2028	2028
		Нечет	>2030	>2030	2029	2024	2030
C10	Двухпутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=850 м	Чет	>>2030	>>2030	>>2030	>>2030	>>2030
		Нечет					
C11	Двухпутная линия, оборудованная автоматической блокировкой $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ (АБ). Длина станционных приемо-отправочных путей Lст=1050 м	Чет	>>2030	>>2030	>>2030	>>2030	>>2030
		Нечет					

Примечание. Участок № 1: Сухэ-Батор-Зунхара; участок № 2: Зунхара-Улан-Батор; участок № 3: Улан-Батор-Чойр; участок № 4: Чойр-Сайншанд; участок № 5: Сайншанд-Дзамын-Удэ.

Рис. 4. График оптимального развития технического оснащения участка Сайншанд-Дзамын-Удэ.



этапного усиления провозной способности.

3. Техничко-экономические расчеты дали возможность для каждого участка дороги определить оптимальную схему увеличения провозной способности и, следовательно, те мероприятия, которые должны быть реализованы в ближайшие и последующие пятилетия.

4. Расчёты показали, что последовательность выбранных мероприятий

практически совпадает на всех участках. В ближайшие пятилетия необходимо построить дополнительные развязки и удлинить приемо-отправочные пути до 1050 м. При таком техническом оснащении Улан-Баторская железная дорога может эксплуатироваться приблизительно до 2020–2023 года. Далее к 2019–2022 годам следует оснастить линию автоблокировкой, которая будет служить до 2028–2030 годов.

Таблица 3

## Схемы развития участка Сайншанд–Дзамын-Удэ

№ пути на графе	Схема развития участка	№ пути на графе	Схема развития участка	№ пути на графе	Схема развития участка
1	$C_1 \rightarrow C_{11}$	15	$C_1 \rightarrow C_5 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	29	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_6 \rightarrow C_{11}$
2	$C_1 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$	16	$C_1 \rightarrow C_5 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$	30	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_5 \rightarrow C_{11}$
3	$C_1 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	17	$C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$	31	$C_1 \rightarrow C_5 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
4	$C_1 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$	18	$C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	32	$C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
5	$C_1 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{11}$	19	$C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$	33	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
6	$C_1 \rightarrow C_6 \rightarrow C_{11}$	20	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$	34	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$
7	$C_1 \rightarrow C_5 \rightarrow C_{11}$	21	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	35	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_7 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
8	$C_1 \rightarrow C_4 \rightarrow C_{11}$	22	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$	36	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_6 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
9	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_{11}$	23	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{11}$	37	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
10	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_{11}$	24	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_6 \rightarrow C_{11}$	38	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$
11	$C_1 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	25	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$	39	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$
12	$C_1 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{10} \rightarrow C_{11}$	26	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	40	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_6 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
13	$C_1 \rightarrow C_7 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	27	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$	41	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_5 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$
14	$C_1 \rightarrow C_6 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$	28	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_7 \rightarrow C_{11}$	42	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_5 \rightarrow C_8 \rightarrow C_{11}$
				43	$C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_5 \rightarrow C_8 \rightarrow C_9 \rightarrow C_{11}$

Таблица 4

## Технико-экономические параметры состояний участка Сайншанд–Дзамын-Удэ

Состояние, $C_i$	Срок истощения провозной способности, $t_{\text{тех}}^i$	Функция приведенных перевозочных затрат, $E(t)$	Капитальные вложения, $K^i$ , млн евро
C2	5	$E2(t) = 20,47 + 3,579t - 0,199t$	1,4
C3	6	$E3(t) = 20,69 + 3,442t - 0,139t$	7,28
C4	7	$E4(t) = 20,87 + 4,023t - 0,215t$	0
C5	9	$E5(t) = 19,06 + 1,014t + 0,1121t$	0,624
C6	9	$E6(t) = 19,32 + 1,596t + 0,0488t$	7,904
C7	9	$E7(t) = 22,65 + 1,513t + 0,1369t$	0,2
C8	11	$E8(t) = 21,13 + 2,702t - 0,036t$	0,624
C9	14	$E9(t) = 20,93 + 3,247t - 0,055t$	0,824

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минаков П. А. Обоснование комплекса технико-технологических параметров работы сортировочной станции в условиях высоких нагрузок / Дис... канд. техн. наук. – М., 2012. – 132 с.
2. Минаков П. А. Взаимодействие основных систем обслуживания поездопотока в парке приёма сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 9. – С. 25–27.
3. Минаков П. А. Использование дифференциальных уравнений для определения технико-технологических параметров работы сортировочной станции // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 3. – С. 19–24.
4. Макарович А. М. Оптимизация развития пропускной способности железнодорожных линий. – М.: Транспорт, 1969. – 198 с.
5. Анисимов В. А. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог с учетом изменения облика и мощности станций и узлов / Дис... док. техн. наук. – Хабаровск, 2005. – 380 с.
6. Холодов П. Н. Выбор оптимального решения в проектировании железных дорог на основе многокритериальной оценки / Автореферат дис... канд. техн. наук. – Иркутск, 2012. – 24 с.
7. Батуринов А. П. Теория выбора оптимального развития технического оснащения сети железных дорог / Дис... док. техн. наук. – М., 2000. – 336 с.
8. Балжир М. Перспективы Улан-Баторской железной дороги // Мир транспорта. – 2014. – № 3. – С. 148–155.
9. Цагаанбанди Г. Новые подходы к стратегии управления в АО «УБЖД» // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 154–160.

Координаты авторов: Батуринов А. П. – baturinap@mail.ru, Балжир Мунхдэлгэр – munhuu\_miit@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.01.2015, актуализирована 03.02.2015, принята к публикации 28.03.2015.

