DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

УДК 656.222.3:004.42

РАСЧЁТ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПАССАЖИРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Эшметова Д.А., *докторант кафедры*
Управление эксплуатационной работой железных дорог,
E-mail: 19dil988@gmail.com,
Ташкентский государственный транспортный университет

Аннотация. *В статье представлен расчёт рациональных параметров и перерабатывающей способности пассажирского технического комплекса с учётом структуры поездопотока, последовательности технологических операций и ограниченности производственных ресурсов. Использованы временные сети Петри и теория массового обслуживания для определения загрузки ресурсов, ожидания и продолжительности подготовки составов. На примере Филиала по технической и технологической подготовке, ремонту пассажирских вагонов (ВЧД-2) и станции Ташкент-Пассажирский установлено, что при потоке 15 составов в сутки коэффициент загрузки пути обмывки и экипировки № 16 зимой составляет 0,946, а допустимая перерабатывающая способность при пороге загрузки 0,85 – 13,5 состава в сутки. Для перспективного потока 28 составов в сутки рассчитан вариант усиления с тремя дополнительными ресурсными единицами, обеспечивающий расчётную продолжительность подготовки 449 мин и перерабатывающую способность 29,9 состава в сутки. Результаты позволяют выявлять ограничивающие элементы и обосновывать потребность в технологических ресурсах; техническая и экономическая реализуемость предложенного усиления требует дополнительной оценки.*

Annotatsiya. *Maqolada yo‘lovchi texnik majmuasining ratsional parametrlarini va qayta ishlash qobiliyatini hisoblash masalasi ko‘rib chiqilgan. Hisoblashda poyezdlar oqimining tarkibi, texnologik operatsiyalar ketma-ketligi va ishlab chiqarish resurslarining cheklanganligi inobatga olingan. Vaqtli Petri to‘rlari va ommaviy xizmat ko‘rsatish nazariyasi yordamida resurslar yuklanishi, kutish va tarkiblarni tayyorlash davomiyligi baholangan. Toshkent-Yo‘lovchi bekati hamda Yo’lovchi vagonlarini texnik va texnologik tayyorlash, ta’mirlash filiali misolida sutkasiga 15 tarkib bo‘lganda 16-sonli yuvish va jihozlash yo‘lining qishki yuklanish koeffitsiyenti 0,946 ekanligi aniqlangan. Ruxsat etilgan yuklanish 0,85 bo‘lganda majmuaning hisobiy qayta ishlash qobiliyati sutkasiga 13,5 tarkibni tashkil etadi. Sutkasiga 28 tarkiblik istiqbolli oqim uchun uchta qo‘shimcha resurs birligidan iborat variant hisoblangan; bunda tayyorlash davomiyligi 449 minut, qayta ishlash qobiliyati esa sutkasiga 29,9 tarkibni tashkil etadi. Taklif etilgan choralarni amaliyotga joriy etishdan oldin texnik va iqtisodiy imkoniyatlarni alohida tekshirish talab etiladi.*

Abstract. *The article presents a calculation of rational parameters and processing capacity of a passenger train servicing complex, taking into account train-category flows, technological sequences and limited production resources. Timed Petri nets and queueing theory are used to estimate resource utilization, waiting times and train-set preparation duration. For the VChD-2 Tashkent-Passenger depot, the winter utilization of washing and servicing track No. 16 is estimated at 0.946 for 15 train sets per day. With an assumed utilization threshold of 0.85, the admissible processing capacity is 13.5 sets per day. For a projected flow of 28 sets per day, a resource reinforcement option comprising three additional units yields a calculated preparation time of 449 minutes and processing capacity of 29.9 sets per day. The findings support identification of bottlenecks and resource planning; technical feasibility and economic efficiency of the proposed reinforcement require separate assessment.*

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

Ключевые слова: *пассажирский технический комплекс, перерабатывающая способность, загрузка ресурсов, временная сеть Петри, теория массового обслуживания.*

Kalit so‘zlar: *yo‘lovchi texnik majmuasi, qayta ishlash qobiliyati, ratsional parametrlar, resurslar yuklanishi, Petri to‘ri, ommaviy xizmat ko‘rsatish nazariyasi.*

Keywords: *passenger technical complex, processing capacity, rational parameters, resource utilization, Petri nets, queueing theory, train-set preparation.*

Введение. При подготовке пассажирских составов ограниченность путей, оборудования и бригад вызывает ожидание и увеличивает продолжительность технологического цикла. Рост объёмов пассажирских перевозок [1] повышает требования к перерабатывающей способности технических комплексов. Исследованы существующий поток ВЧД-2 Ташкент-Пассажирский (15 составов/сут) и перспективный поток к 2030 г. (28 составов/сут) при нормативе подготовки 480 мин [2, 3]. **Цель работы** – определить рациональные параметры и перерабатывающую способность комплекса с учётом структуры поездопотока и загрузки ресурсов. **Объект исследования** – процессы подготовки пассажирских составов в ВЧД-2, **предмет** – зависимость загрузки ресурсов, продолжительности цикла и перерабатывающей способности от интенсивности потока и оснащения. Предложена единая расчётная процедура, объединяющая описание последовательных и параллельных операций временной сетью Петри с оценкой ресурсных ограничений средствами теории массового обслуживания.

Обзор литературы по теме. Имитационное моделирование транспортных процессов рассмотрено в [4–6], сети Петри – в [7–9], оптимизация обслуживания и маневровой работы – в [10, 11], взаимодействие в транспортных и производственно-транспортных системах – в [12], теория массового обслуживания – в [13, 14]. В настоящей работе эти подходы применены для оценки ограничений перерабатывающей способности ВЧД-2 [3, 15–17].

Методология исследования. Для категории составов k задаются суточный поток N_k, число обращений a_{ik} и продолжительность занятия t_{ik} ресурса i, для каждого ресурса – число каналов c_i. Последовательность операций описывается временной сетью Петри, загрузка и ожидание – моделями массового обслуживания [13–15]. Расчёт реализован в программах DGU 69441 (загрузка ресурсов и варианты усиления) и DGU 69243 (перерабатывающая способность в зависимости от поездопотока) [18, 19]. Структура расчётной модели приведена на рис. 1.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

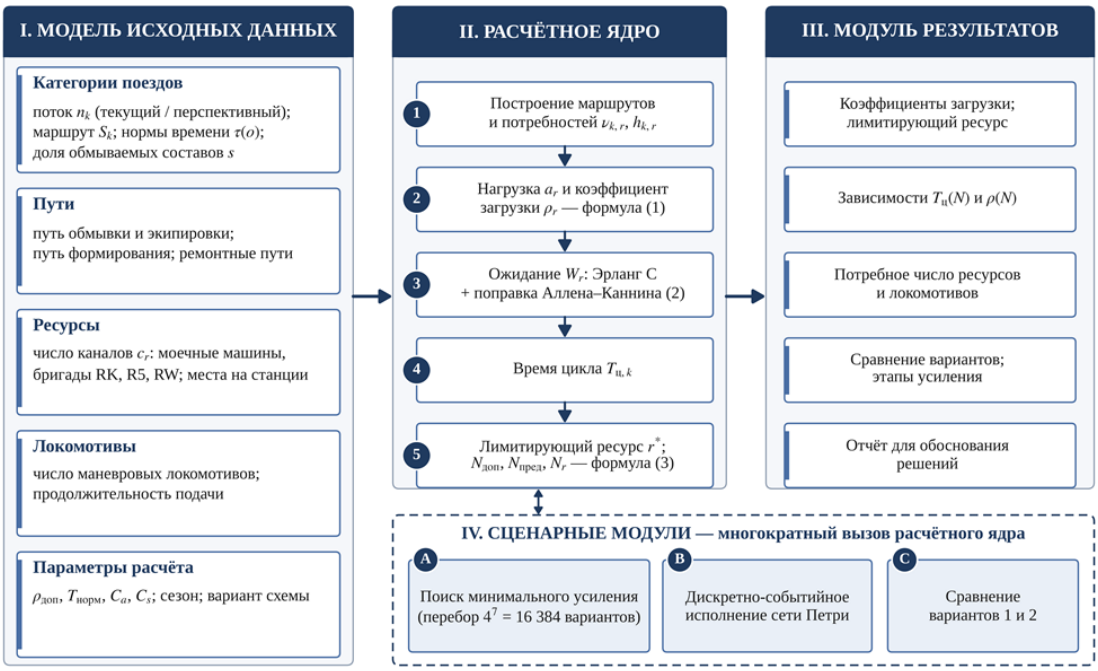

Рис. 1. Структура программного комплекса и модель исходных данных

Исходные данные включают пять групп: категории составов, пути, бригады и оборудование, маневровые локомотивы, расчётные параметры (табл. 1). Маршруты и продолжительность операций приняты по технологическим графикам и нормативам ВЧД-2 [3]. При отсутствии хронометражных рядов коэффициенты вариации интервалов поступления $C_a = 0,5$ и времени обслуживания $C_s = 0,4$ приняты как сценарные допущения, а не как значения, установленные ТНК; их следует уточнить по наблюдениям.

Таблица 1

Группы исходных данных и их значения для ВЧД-2 (существующая схема)

Группа	Содержание	Пример для ВЧД-2
Категории поездов	поток n_k, составов в сутки; маршрут; нормы времени операций; доля обмываемых составов s	дальнего следования - 4, местного сообщения - 1, скоростные - 5, пригородные - 5
Пути	путь обмывки и экипировки, путь формирования, ремонтные пути	путь № 16 (одна моечная машина), путь № 14, 6 ремонтных путей
Ресурсы	число каналов c_r	бригады ремонта R5 - 2, уборки RW - 1, осмотра RK - 1
Локомотивы	число маневровых локомотивов, время подачи	3 тепловоза ТЭМ-2, подача 15 мин
Параметры расчёта	$\rho_{доп}$, $T_{норм}$, C_a, C_s, сезон, вариант схемы	0,85; 480 мин; 0,5; 0,4; зима

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

Расчёт выполняется последовательно: по технологическим маршрутам определяются обращения к ресурсам и время их занятия с учётом доли обмываемых составов и зимнего увеличения продолжительности экипировки на 30 мин; затем рассчитываются суточная нагрузка и коэффициенты загрузки ресурсов:

$$a_r = \sum_k \frac{n_k}{1440} h_{k,r}, \rho_r = \frac{a_r}{c_r}. (1)$$

Для ресурсов с $\rho_r < 1$ среднее ожидание вычисляется по формуле Эрланга С с поправкой Аллена–Каннина [13, 14]:

$$W_r = \frac{P_{w,r}}{\lambda_r} \cdot \frac{\rho_r}{1-\rho_r} \cdot \frac{C_a^2 + C_s^2}{2}, (2)$$

где $P_{w,r}$ - вероятность ожидания по формуле Эрланга С,

λ_r - интенсивность обращений к ресурсу,

C_a и C_s - коэффициенты вариации интервалов поступления и времени обслуживания;

при $\rho_r \geq 1$ ресурс помечается как перегруженный ($W_r = \infty$).

Время цикла состава получается суммированием длительностей операций и ожиданий по маршруту; для параллельных работ на ремонтном пути берётся наибольшая из ветвей. Наконец, определяются узкое место r^* (ресурс с наибольшей загрузкой), допустимая и предельная пропускная способность и требуемое число каналов:

$$N_{доп} = N_0 \frac{\rho_{доп}}{\rho_{r^*}}, N_{пред} = \frac{N_0}{\rho_{r^*}}, N_r = \frac{a_r}{\rho_{доп}}. (3)$$

Подробное описание построения модели приведено в [15].

Сценарные модули. Модуль поиска реализует перебор приращений числа каналов $\Delta c_r \in \{0,\ldots,3\}$ для семи ресурсов и выбирает вариант с минимальным числом добавляемых единиц:

$$\min Z = \sum_r \Delta c_r \text{ при } \max_r \rho_r \leq \rho_{доп},\ T_c \leq T_{норм}. (4)$$

Всего проверяется 4^7 = 16 384 варианта. Затем жадным правилом строится очерёдность мер: сначала усиливается узкое место, пока его загрузка выше допустимой, затем ресурс с наибольшим сокращением времени цикла. Модуль дискретно-событийного моделирования исполняет сеть Петри во времени с моментами прибытия из планов формирования [16] и служит для проверки аналитических оценок ядра. Расчётное исследование выполняется в шесть последовательных этапов (рис. 2). На первом этапе формируются исходные данные на основании технологических графиков и технологического процесса депо [17]. На втором этапе проводится калибровка модели путём уточнения доли составов, проходящих обмывку, при сопоставлении расчётной и наблюдаемой среднегодовой продолжительности технологического цикла. На третьем этапе оценивается существующее состояние комплекса, определяются коэффициенты загрузки ресурсов и выявляются ограничивающие элементы технологического процесса. На четвёртом этапе задаются перспективные значения поездопотока с учётом его структуры. На пятом этапе проводится сравнительная оценка существующей и проектной схем, определяется минимально необходимое усиление производственных ресурсов для выполнения установленных ограничений по загрузке и продолжительности подготовки составов. На заключительном этапе обобщаются результаты расчётов и формируется

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

последовательность рекомендуемых мероприятий по развитию пассажирского технического комплекса.



Рис. 2. Технология работы пользователя с программным комплексом

Верификация вычислительного алгоритма включает контрольный пересчёт коэффициентов загрузки по формуле (1) и независимую реализацию на Python. Для оценки соответствия модели условиям эксплуатации аналитические результаты сопоставляются с дискретно-событийным моделированием и наблюдаемой продолжительностью подготовки.

Анализ и результаты. При существующем потоке 15 составов/сут калибровка дала долю обмываемых составов 0,92. Зимой коэффициент загрузки пути № 16 составляет 0,946, остальных ресурсов – не более 0,65. Расчётное ожидание освобождения пути № 16 достигает 344 мин; полный цикл подготовки – 738 мин при нормативной продолжительности операций 408 мин. Эти показатели относятся к различным расчётным характеристикам и не суммируются непосредственно. При допустимой загрузке 0,85 перерабатывающая способность составляет 13,5 состава/сут, что ниже фактического потока. При перспективном потоке 28 составов/сут без усиления загрузка пути № 16 достигает 1,875, уборочной бригады – 1,24; существующая схема не обеспечивает устойчивого обслуживания. Из 16 384 рассмотренных сочетаний ресурсов алгоритм отобрал 9024 варианта для дальнейшего анализа. Вариант с минимальным числом добавляемых ресурсных единиц включает второй канал обмывки на предполагаемом пути № 16б, вторую уборочную и третью ремонтную бригады, а также параллельную экипировку. Расчётная продолжительность цикла составляет 449 мин, перерабатывающая способность – 29,9 состава/сут. Вариант с девятью дополнительными единицами сокращает цикл до 445 мин [15]. Возможность строительства пути № 16б и размещения оборудования требует технического и экономического обоснования. Зависимости загрузки от интенсивности потока (рис. 3) показывают, что путь № 16 достигает допустимой загрузки при 13,5 состава/сут и полной расчётной загрузки при 15,9 состава/сут; уборочная бригада – допустимой загрузки при 20 составах/сут. Следовательно, первоочередное усиление требуется для операций обмывки и уборки.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

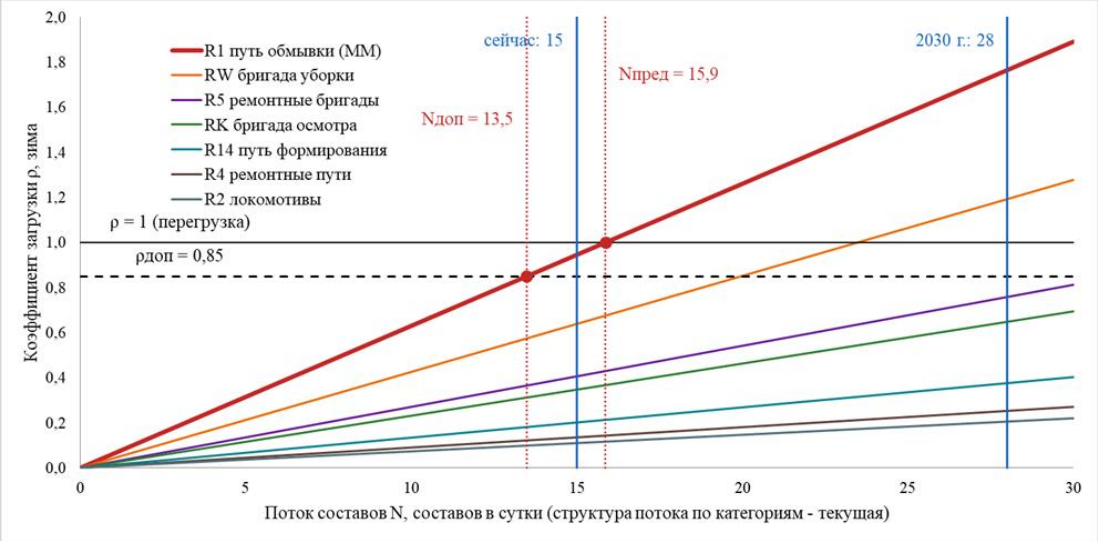

Рис. 3. Загрузка ресурсов ВЧД-2 зимой в зависимости от суточного потока составов при существующих ресурсах и текущей структуре потока по категориям

Структура загрузки пути № 16 по категориям составов приведена на рис. 4. При существующем потоке расчётная потребность в занятии пути составляет 1362 мин/сут, причём 81 % приходится на составы дальнего следования и скоростные. К 2030 г. потребность возрастает до 2700 мин/сут, из которых 73 % формируют составы дальнего следования и местного сообщения. Совмещение обмывки и экипировки снижает расчётный коэффициент загрузки с 1,875 до 1,479 (на 21,1 %), однако не устраняет перегрузку одного канала.

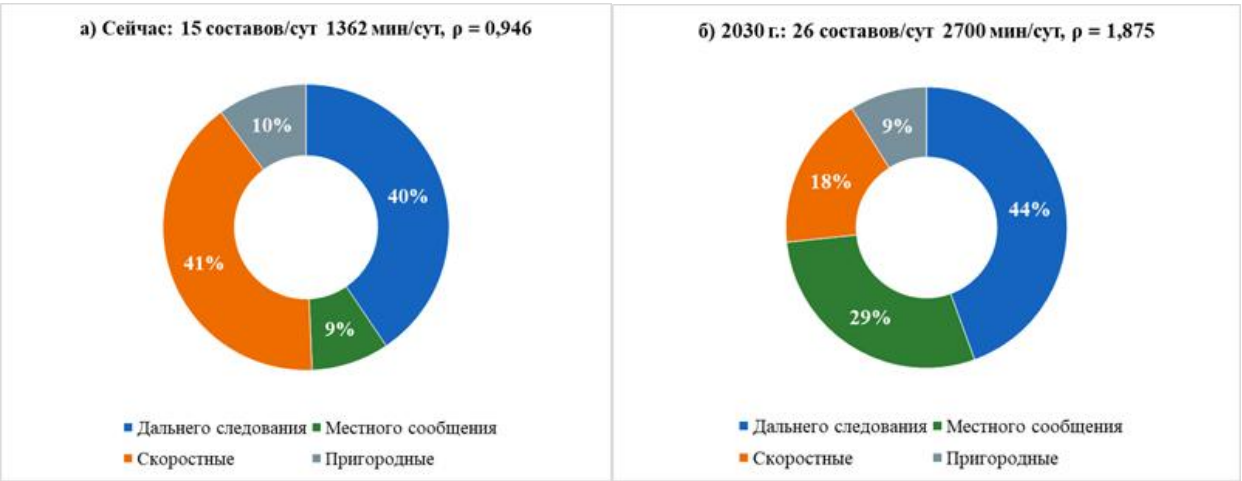

Рис. 4. Структура суточного времени занятия пути обмывки и экипировки № 16 по категориям поездов, зима

Сравнение вариантов усиления (рис. 5) показывает, что проектная схема предусматривает девять дополнительных единиц, в том числе два локомотива и три ремонтных пути, загрузка которых в исследованной схеме не превышает 0,26. Минимальный расчётный вариант предусматривает три дополнительные ресурсные единицы: моечную машину на предполагаемом пути № 16б, ремонтную и уборочную бригады. В обоих вариантах расчётная продолжительность цикла сокращается с 738 до 445–449 мин при нормативе 480 мин; различие составляет 4 мин. Число добавляемых единиц сравнивается в рамках модели и не отражает полного объёма инфраструктурных затрат.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

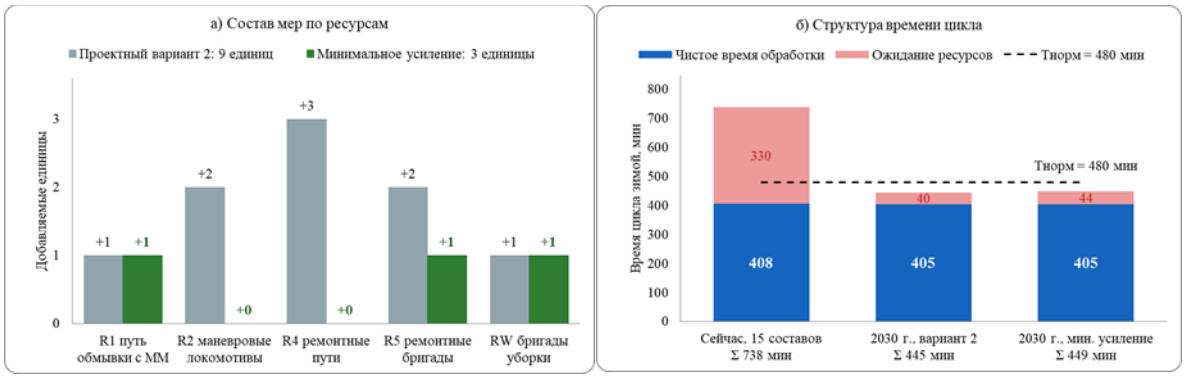

Рис. 5. Сравнение проектного варианта и минимального усиления: а) добавляемые единицы по ресурсам, б) чистое время обработки и ожидание в цикле подготовки, зима

Для верификации расчётной модели выполнен контрольный расчёт коэффициентов загрузки производственных ресурсов на основании нормативной продолжительности технологических операций ВЧД-2 по формуле (1). В частности, для пути № 16 в зимний период при существующей интенсивности поездопотока суммарная расчётная потребность во времени занятия составляет 1361,6 мин в сутки. При суточном фонде времени 1440 мин коэффициент загрузки данного ресурса равен: ρ = 1361,6 / 1440 = 0,946. Сопоставление результатов контрольных вычислений и программного расчёта представлено в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2

Сопоставление расчётных коэффициентов загрузки производственных ресурсов ВЧД-2 в зимний период

Ресурс	c_r сейчас	Ручной расчёт, сейчас	Программа, сейчас	c_r 2030 г.	Ручной расчёт, 2030 г.	Программа, 2030 г.
R1 - путь обмывки и экипировки	1	0,946	0,94	2	0,740	0,74
RW - бригады уборки	1	0,639	0,64	2	0,618	0,62
R5 - ремонтные бригады	2	0,406	0,40	3	0,528	0,53
RK - бригада осмотра	1	0,347	0,35	1	0,611	0,61
R14 - путь формирования	1	0,201	0,20	1	0,403	0,40
R4 - ремонтные пути	6	0,135	0,13	6	0,264	0,26
R2 - маневровые локомотивы	3	0,110	0,11	3	0,190	0,19

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

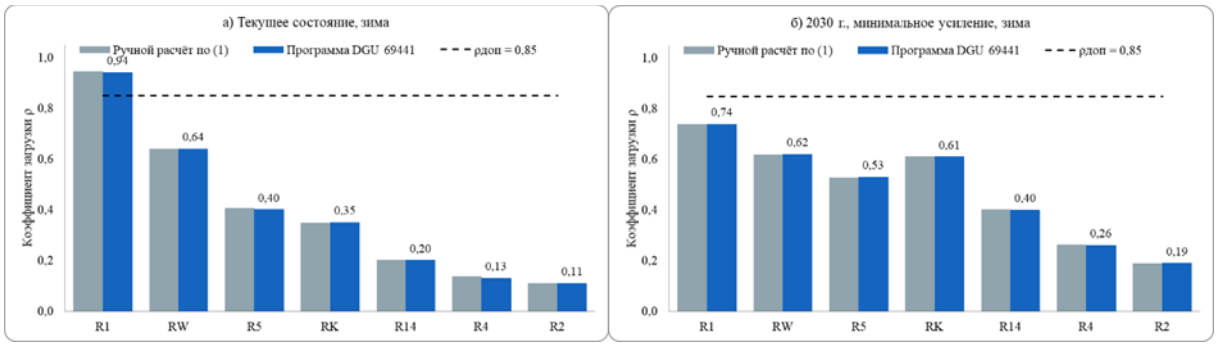

Рис. 6. Сопоставление коэффициентов загрузки производственных ресурсов ВЧД-2 в зимний период по результатам контрольного и программного расчётов: а – существующая схема (15 составов/сут), б – перспективная схема при минимальном усилении (28 составов/сут)

Обсуждение. Контрольный и программный расчёты дали близкие коэффициенты загрузки для существующей и усиленной перспективной схем (табл. 2, рис. 6). При потоке 28 составов/сут загрузка пути № 16 последовательно составляет 1,875 без изменений, 1,479 после параллелизации обмывки и экипировки и 0,740 в варианте усиления с двумя каналами. Независимая реализация на Python воспроизвела расчётные результаты. Среднегодовое время подготовки по модели составило 567 мин против наблюдаемых 564 мин (отклонение 0,53 %); расхождение аналитического и дискретно-событийного расчётов для перспективного потока 2–7 % [15]. Поскольку наблюдаемое время использовалось при калибровке, совпадение не следует считать независимой эмпирической валидацией. Аналитическая модель не полностью учитывает блокировку путей ожидающими составами и неравномерность поступления поездов; поэтому результаты перспективных сценариев следует сопоставлять с дискретно-событийным моделированием. Коэффициенты вариации, принятые при отсутствии хронометража, требуют уточнения по эксплуатационным данным. Программная реализация позволяет оперативно сравнивать варианты ресурсного оснащения, однако их практическое применение зависит от технической осуществимости.

Выводы и предложения. Предложена расчётная процедура определения рациональных параметров пассажирского технического комплекса с применением временной сети Петри и моделей массового обслуживания; её программная реализация представлена свидетельствами DGU 69441 и DGU 69243. Для ВЧД-2 установлен ограничивающий ресурс – путь № 16 с зимней загрузкой 0,946. При пороге 0,85 допустимый поток составляет 13,5 состава/сут против фактических 15. При перспективном потоке 28 составов/сут загрузка пути № 16 без усиления достигает 1,875, параллелизация операций снижает её до 1,479, но не устраняет ограничение. Расчётный вариант с дополнительным каналом обмывки, второй уборочной и третьей ремонтной бригадами обеспечивает цикл 449 мин и перерабатывающую способность 29,9 состава/сут. По сравнению с вариантом из девяти добавляемых единиц продолжительность цикла больше лишь на 4 мин. Контрольные расчёты и независимая реализация подтверждают согласованность вычислений; расхождение аналитической и имитационной оценок составляет 2–7 %. Рекомендуется уточнять исходные параметры по хронометражу и проверить техническую и экономическую осуществимость второго пути обмывки.

Список литературы

1. Годовой отчёт АО «Ўзбекистон темир йўллари» за 2024 год: железнодорожная инфраструктура и пассажирские перевозки. – Ташкент, 2024.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.18

2. Технический паспорт и эксплуатационная статистика пассажирского вагонного депо ВЧД-2 Ташкент-Пассажирский за 2024 год: внутренний технический отчёт. – Ташкент, 2024.

3. Технологические графики подготовки пассажирских составов в рейс / Пассажирское вагонное депо ВЧД-2 Ташкент-Пассажирский. – Ташкент, 2025.

4. Borshchev A. The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6. – Chicago: AnyLogic North America, 2013.

5. Kelton W.D., Sadowski R.P., Zupick N.B. Simulation with Arena. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2015.

6. Сугоровский А.В. Обоснование этапности развития пассажирских технических станций: автореф. дис. … канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2010.

7. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems. – Berlin: Springer, 2009.

8. Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications // Proceedings of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, No. 4. – P. 541–580.

9. Szymula C., Bešinović N., Nachtigall K. Quantifying periodic railway network capacity using Petri nets and macroscopic fundamental diagram // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2024. – Vol. 158. – 104436.

10. Wang J. Maintenance scheduling at high-speed train depots: An optimization approach // Reliability Engineering & System Safety. – 2024. – Vol. 243. – 109809.

11. van den Broek R., Hoogeveen H., van den Akker M., Huisman B. A local search algorithm for train unit shunting with service scheduling // Transportation Science. – 2022. – Vol. 56, No. 1. – P. 141–161.

12. Владимирская И.П. Оптимизация структурно-функционального взаимодействия в транспортных и производственно-транспортных системах: дис. … д-ра техн. наук. – М., 2011.

13. Shortle J.F., Thompson J.M., Gross D., Harris C.M. Fundamentals of queueing theory. – 5th ed. – Hoboken: Wiley, 2018.

14. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory physics. – 3rd ed. – Long Grove: Waveland Press, 2011.

15. Eshmetova D., Rasulov M., Ibragimova G. Optimising the parameters of a passenger train servicing complex using timed Petri nets and queueing theory based on train category flows // AIP Conference Proceedings. – 2026 (в печати).

16. Планы формирования поездов / Пассажирское вагонное депо ВЧД-2 Ташкент-Пассажирский. – Ташкент, 2025–2026.

17. Технологический процесс работы филиала по техническому и технологическому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов (ВЧД-2) / АО «Ўзтемирйўлйўловчи». – Ташкент, 2019.

18. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 69441. Yo‘lovchi texnik majmuasining ratsional parametrlarini hisoblash [Расчёт рациональных параметров пассажирского технического комплекса] / Расулов М.Х., Ибрагимова Г.Р., Каюмов Ш.Ш.; правообладатель Эшметова Д.А. – Ташкент: Министерство юстиции Республики Узбекистан, 2026.

19. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 69243. Yo‘lovchi tarkiblarining toifalar bo‘yicha soniga bog‘liq holda qayta ishlash qobiliyatini hisoblash [Расчёт перерабатывающей способности в зависимости от числа пассажирских составов по категориям] / Расулов М.Х., Ибрагимова Г.Р., Каюмов Ш.Ш.; правообладатель Эшметова Д.А. – Ташкент: Министерство юстиции Республики Узбекистан, 2026.