



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.211.5

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-10>

Методика определения рационального порядка использования маневровых локомотивов на пассажирской станции



Екатерина КУЛИКОВА



Павел МИНАКОВ

Екатерина Борисовна Куликова ¹,
Павел Андреевич Минаков ²

^{1, 2} Российский университет транспорта (МИИТ),
Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0002-2904-0626; Scopus Author ID:
57214271685; РИНЦ SPIN-код: 9454-4823; РИНЦ
Author ID: 360594.

² ORCID 0000-0002-1194-2621; РИНЦ SPIN-код:
2484-3100; РИНЦ Author ID: 1057564.

✉ ¹ iuit_kulikova@inbox.ru.

АННОТАЦИЯ

Железнодорожный транспорт является одним из важнейших перевозчиков пассажиров в Российской Федерации. На его долю в 2023 году пришлось более 35 % всех пассажирских перевозок. При этом на дальнейшее сообщение – почти 37 % от общего объема перевозок железнодорожным транспортом. Анализ динамики изменения пассажирооборота и объемов перевозок говорят о том, что рынок не только восстановился после беспрецедентного падения 2020 года, но продолжает уверенно расти. Рост объемов пассажирских перевозок влечет за собой увеличение объемов работы пассажирских и пассажирских технических станций. Увеличивается нагрузка на вокзальные комплексы (особенно в периоды массовых перевозок). Перевозчики постоянно работают над формированием новых транспортных продуктов, отличающихся скоростью и уровнем комфорта. Например, только АО «ФПК» сегодня предлагает своим клиентам порядка 90 комбинаций предложений, отличающихся не только категорией поезда, типом вагона, но и набором услуг в пути следования. При этом, очевидно, ключевым требованием, независимо от класса, явля-

ется высокое качество подготовки составов в рейс и слаженная работа всех подразделений пассажирского комплекса.

В настоящее время большинство исследований пассажирской инфраструктуры железнодорожного транспорта посвящено исследованию ее отдельных объектов, например, особенностям проектирования и эксплуатации транспортно-пересадочных узлов, технологии работы пассажирских и пассажирских технических станций. При этом мало внимания уделяется комплексному функционированию «пассажирской станции – пассажирской технической станции – транспортно-пересадочного узла» как единой системы. В статье предлагается математическая формализация процесса рациональной последовательности обслуживания пассажирских поездов с использованием методов линейного программирования, позволяющая решать целый ряд эксплуатационных задач и проводить исследования по оценке уровня влияния различных факторов на показатели работы пассажирских и пассажирских технических станций.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, пассажирская станция, пассажирская техническая станция, занятость приёмно-отправочных путей, загрузка маневрового локомотива, ритмичность работы станции.

Для цитирования: Куликова Е. Б., Минаков П. А. Методика определения рационального порядка использования маневровых локомотивов на пассажирской станции // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 3 (112). С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-3-10>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В основе функционирования комплекса «пассажирская станция – пассажирская техническая станция – транспортно-пересадочный узел (далее – ТПУ)» как единой системы, прежде всего, лежит технология обслуживания пассажирских поездов [1–5]. Порядок обслуживания пассажирских поездов на станциях принципиально отличается от грузовых.

Так при определенной загрузке «обслуживающих станционных устройств» и неравномерности поступления грузовых поездов на обслуживание появляется очередь, зависящая от «мощности» устройств, обеспечивающих переход грузовых вагонов из одной системы обслуживания в следующую. Время нахождения грузовых вагонов (составов грузовых поездов) на станции, в отличие от пассажирских, зависит от «мощности» обслуживающих устройств, величины вагонопотоков и чаще не привязано к конкретным ниткам графика.

В пассажирском движении, исходя из графика оборота, составы привязаны к определенным ниткам графика движения поездов по отправлению и их обслуживание подчинено главной цели – отправлению готового состава с пассажирами в фиксированное время, по расписанию. В этих условиях загрузка обслуживающих устройств (маневро-

вых локомотивов, приемо-отправочных путей, путей экипировки и пр.) не должна определяться формально как доля времени непосредственно выполняемой работы по отношению к рассматриваемому периоду времени (сутки или величина интенсивного периода работы). Подготовка и подача составов к отправлению по расписанию будет предполагать определенные интервалы между окончанием работы с одним составом и началом работы с другим. В случае если эти интервалы такой продолжительности, что не могут быть использованы для выполнения локомотивом другой работы, они также должны быть отнесены ко времени работы, увеличивая загрузку локомотивов [6].

Тогда при фиксированном графике отправления, например, пассажирских поездов дальнего следования и учете фактического объема работы станционных устройств загрузка маневрового локомотива будет представлять некоторую зависимость от числа составов, выводимых за определенный период времени (рис. 1).

Анализ работы маневровых локомотивов на пассажирских станциях показал [7]:

– в их работе есть периоды (период интенсивного прибытия и отправления поездов, период до и после проведения технического обслуживания (далее – ТО) локомотива, операций по смене локомотивных

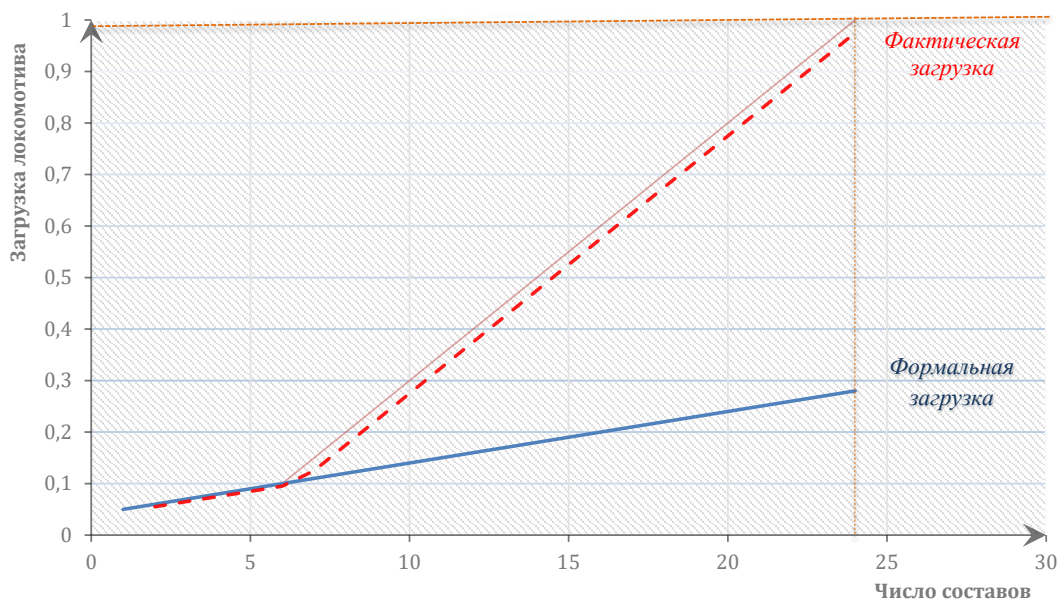


Рис. 1. Общий характер изменения загрузки маневрового локомотива в зависимости от количества обслуживаемых составов пассажирских поездов на станции [выполнено авторами].



бригад), когда загрузка локомотива практически равна единице. Так на станции Москва-пассажирская Казанская первый локомотив при среднесуточной загрузке 0,72 имеет два периода по 3,5 часа, когда даже небольших перерывов в его работе нет. Второй локомотив при среднесуточной загрузке 0,65 имеет также два таких периода продолжительностью шесть и пять часов. Причем резервов для увеличения объемов работы у локомотивов практически нет.

– для снижения загрузки локомотивов в такие периоды практикуется «преждевременный» вывод составов на приемо-отправочные пути или более поздний вывод составов с них для последующей работы с составами в соответствии с технологическим процессом (по технологической линии). Что, в свою очередь, приводит к увеличению продолжительности занятости приемо-отправочных путей.

На практике, как правило, необходимо одновременно отвечать на два вопроса:

1. Справится ли маневровый локомотив с заданным объемом работы?

2. Возможно ли реализовать «преждевременный» вывод составов на приемо-отправочные пути и/или вывод составов с них с задержкой относительно технологического времени, уменьшив непроизводительные простои маневрового локомотива при выполнении заданного объема работы, исходя из имеющегося числа приемо-отправочных путей и расписания прибытия/отправления пассажирских поездов (заданного числа составов пассажирских поездов)?

Ответ на эти вопросы фактически является решением задачи проверки устойчивости работы маневровых локомотивов при заданном объеме работы, технико-технологических возможностях станции и фиксированном расписании прибытия и отправления пассажирских поездов на станцию.

Рассмотрим условия возможности выполнения маневровым локомотивом заданного объема работы.

Формально среднесуточную загрузку маневрового локомотива можно определить по формуле (1):

$$\Psi_{\text{лок}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\text{раб}}}{(1440 - T_{\text{пер}}) \cdot K_n \cdot \alpha_{\text{вр}}}, \quad (1)$$

где $t_i^{\text{раб}}$ – время работы локомотива с i -м номером состава, который определен на вре-

менной оси при условии возрастания технологически обоснованных времён начала работы с ним (исходя из времён прибытия и отправления пассажирских поездов и почтово-багажных поездов, а также времён начала операций по ТО и смене бригад);

n – общее число поездов, прибывающих и отправляющихся за сутки, с которыми работает маневровый локомотив (переставляя составы между ПОП и путями отстоя/экипировки/ремонта/...);

$T_{\text{пер}}$ – перерывы во времени работы маневрового локомотива (время, которое локомотив не находится в рабочем парке в течение суток);

K_n – коэффициент, учитывающий возможные перерывы в маневровой работе из-за отказов технических средств (коэффициент надёжности инфраструктуры)¹;

$\alpha_{\text{вр}}$ – коэффициент враждебности передвижений, который учитывает продолжительность операций, вызывающих перерывы в выполнении маневровой работы, в общей продолжительности суток.

В грузовом движении на проведение работ выстраивается очередь из составов. Она может быть больше или меньше в зависимости от периода суток и интенсивности работы с составами. В любом случае при загрузке локомотива меньше 1,0 (а в интенсивные периоды может быть и больше 1,0) локомотив в среднем за сутки выполняет заданный объем, лишь увеличивая из-за очередей среднее время прохождения составов по технологической линии [8; 9].

В пассажирском движении составы привязаны к временам прибытия и отправления, и во всех случаях эти расписания надо выполнять. Поэтому условие $\Psi_{\text{лок}} \leq 1$ является необходимым (далее – НУ), но не достаточным.

Определим достаточные условия (далее – ДУ) выполнения работы для маневрового локомотива с пассажирскими поездами при условии заданного фиксированного расписания выполнения работ.

Пусть определены:

$t_i^{\text{нач. раб}}$ – технологически обоснованные времена начала работы маневрового локомотива с пассажирскими, почто-багажными поездами по прибытию, отправлению (осно-

¹ Методика оценки и контроля эффективности использования локомотивов маневрового движения: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 01 декабря 2017 г. № 2485/р.

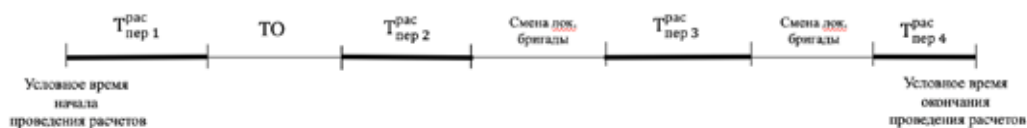


Рис. 2. Периоды занятости маневрового локомотива в течение суток [выполнено авторами].

ванные на расписании прибытия-отправления этих поездов);

i – порядковый номер работы маневрового локомотива с составами, определяемый в возрастающем порядке времен расположенных на временной оси.

Тогда суточный временной отрезок будет разбит на $(n + 1)$ отрезки, границами которых будут смежные на временной оси времена начала работ, включая время начала и конца суток.

Сгруппируем времена начала работы маневрового локомотива с составами по отдельным непересекающимся расчётным периодам времени $T_{\text{пер}}^{\text{рас}}$ (рис. 2), границами которых будут:

- времена начала и окончания общего (совокупного) периода – сутки;
- времена начала и окончания периодов проведения маневровым локомотивом работ, не относящихся к работе с составами (технический осмотр, экипировка, смена локомотивных бригад).

В приведенном на рис. 2 примере в сутках четыре расчетных периода:

1. от 0 мин (условно) до времени начала ТО локомотива;
2. от времени окончания ТО локомотива до времени начала первой смены локомотивной бригады;
3. от времени окончания первой смены локомотивной бригады до времени начала второй смены локомотивной бригады;
4. от времени окончания второй смены локомотивной бригады до 1440 мин (условно) – времени окончания расчетных суток.

Времена начала работы ($t_i^{\text{нач. раб}}$), находящиеся на отрезках временной оси, которым не хватает технологически обоснованного рабочего времени маневрового локомотива в данном расчётном периоде ($T_{\text{пер}}^{\text{рас}}$) (либо они приходится на нерабочий для локомотива отрезок времени), переносятся на другие расчетные периоды в соответствии со следующими правилами:

- времена работы с составами по прибытию – в следующий (за нерабочим периодом) расчетный период: $t_{i, \text{приб}}^{\text{нач. раб}} = T_{\text{пер}}^{\text{нач}}$;

– времена работы с составами по отправлению – в предыдущий (перед нерабочим периодом) расчетный период:

$$t_{i, \text{отпр}}^{\text{нач. раб}} = T_{\text{пер}}^{\text{кон}} - t_i^{\text{раб}}.$$

НУ выполнения маневровым локомотивом заданного объема работы при безусловном обеспечении графика прибытия и отправления пассажирских поездов следует считать соблюдение неравенств для каждого из таких расчетных периодов ($T_{\text{пер}}^{\text{рас}}$) (2):

$$\sum_{i=1}^k \frac{t_i^{\text{раб}}}{T_{\text{пер}}^{\text{раб}}} \leq 1, \quad (2)$$

где k – общее количество времён работы локомотива, находящихся на временном отрезке расчетного периода, включая перенесенные на данный расчетный период;

i – порядковый номер работы локомотива на временном отрезке расчетного периода, определенный в возрастающем порядке расположения на временной оси.

ДУ заключаются в том, чтобы в рамках каждого расчетного периода ($T_{\text{пер}}^{\text{рас}}$) были использованы все свободные от работы промежутки времени путем смещения технологически обоснованных времён начала работ маневровым локомотивом с составами ($t_i^{\text{нач. раб}}$) в рамках разрешенного интервала времени, расположенных левее или правее на временной оси от технологически обоснованного времени начала работ в зависимости от характера работы (по прибытию или отправлению).

ДУ должны быть выполнены для всех расчетных периодов. В противном случае следует провести пересчет с учетом переноса первых времён начала работ (по отправлению) в смежный предшествовавший расчетный период и последних времён начала работы (по прибытию) в смежный последующий расчетный период. Этим можно добиться перераспределения объемов работы локомотива в расчетные периоды, но в ущерб суммарному времени занятия составами прямо-отправочных путей.

Аналитически ДУ для расчетного периода (без разрешенного смещения технологически обоснованного времени начала работы с со-



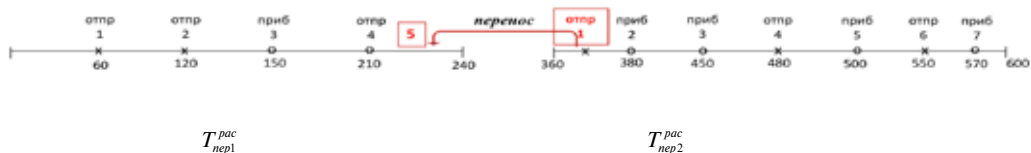


Рис. 3. Пример выполнения НУ и ДУ для смежных расчетных периодов в общем временном отрезке [выполнено авторами].

ставом) принимает вид (3):

$$\frac{t_n^{раб}}{t_{n+1}^{нач.раб} - t_n^{нач.раб}} \leq 1 \quad \forall n = k, k-1, \dots, 1, \quad (3)$$

где $t_{k+1}^{раб} = T_{пер}^{рас}$

Рассмотрим примеры выполнения НУ и ДУ при $t_i^{раб} = 30$ мин² для двух смежных расчётных периодов на общем временном отрезке в 600 мин (рис. 3).

Первый расчётный период ($T_{пер1}^{рас}$):

$$k=5, \text{необходимое условие } \psi = \frac{150}{240} = 0,625$$

$$n=5, \frac{30}{240 - 210} = 1;$$

$$n=4, \frac{30}{210 - 210} = \infty, \text{ ДУ не выполняется;}$$

$$n=3, \frac{30}{210 - 150} = 0,5;$$

$$n=2, \frac{30}{150 - 120} = 1;$$

$$n=1, \frac{30}{120 - 60} = 0,5$$

Второй расчётный период ($T_{пер2}^{рас}$):

$$k=7, \text{необходимое условие } \psi = \frac{180}{240} = 0,75$$

$$n=6, \frac{30}{600 - 570} = 1;$$

$$n=5, \frac{30}{570 - 550} = 1,5; \text{ ДУ не выполняется;}$$

$$n=4, \frac{30}{550 - 500} = 0,6;$$

$$n=3, \frac{30}{500 - 480} = 1,5; \text{ ДУ не выполняется;}$$

$$n=2, \frac{30}{480 - 450} = 1;$$

$$n=1, \frac{30}{450 - 380} = 0,467.$$

Невыполнение ДУ (без разрешенного смещения технологически обоснованного времени начала работы с составом) не означает, что

маневровый локомотив не выполнит работу в данном расчетном периоде. Это будет возможно, если разрешить смещение при условии увеличения времени занятия ПОП составами.

Предположим (в рамках данной локальной задачи), что допустимо неограниченное увеличение времени занятия приемо-отправочных путей составами (т.е. их загрузка небольшая и не является лимитирующей).

Использование (или невозможность использования) свободных интервалов времени для выполнения маневровым локомотивом работы в расчетный период зависит от:

- заданного расписания прибытия и отправления пассажирских поездов на / со станции;
- последовательности работы в этот период с поездами по прибытию и отправлению, т.к. возможность смещения от технологически обоснованного времени работы с составом в этих вариантах различно (вправо или влево на временной оси).

Тогда задача о выполнении маневровым локомотивом своей работы сводится к решению задачи нахождения минимума линейной функции при заданных ограничениях в виде равенств и неравенств. Поставим эту задачу.

Условные обозначения:

n – количество пассажирских поездов в рассматриваемом периоде времени;

m – количество прочих поездов, требующих обслуживания маневровым локомотивом;

t_i^{np} – время прибытия i -го пассажирского поезда на станцию (отсчет времени может вестись с любой временной точки). Длительность расчетного периода может быть любой (i – порядковый номер (условный) поезда в расчетном периоде);

t_i^{om} – время отправления i -го пассажирского поезда со станции по расписанию;

t_i^{yb} – время уборки (перестановки) состава i -го пассажирского поезда с приемо-отправочных путей на пути экипировки (отстоя), включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки, время на перестановку почтово-багажных вагонов

² Для решения примера принимается случайное время с целью проверить ход расчетов.

к местам погрузки и выгрузки (при необходимости) и время на подформирование состава при постановке на простой;

$t_i^{под}$ – время подачи (перестановки) состава i -го пассажирского поезда с путей отстоя на приемо-отправочные пути, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки, включая время на прицепку почтовых и багажных вагонов в состав пассажирского поезда и подформирование состава при его перестановке с путей отстоя;

$t_i^{раб\ по\ н-б}$ – время работы локомотива с прибывающим почтово-багажным составом, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки по прибытию поезда;

$t_i^{пр\ н-б}$, $t_i^{отпр\ н-б}$ – расписание соответственно прибытия и отправления i -го почтово-багажного поезда;

$t_i^{нач\ раб\ н-б\ по\ приб}$ – наименьшее на числовой оси (самое раннее) технологически обоснованное время начала работы с i -м почтово-багажным поездом после его прибытия (4):

$$t_i^{нач\ раб\ н-б\ по\ приб} = t_i^{пр\ н-б} + t_i^{техн\ приб\ н-б}, \quad (4)$$

где $t_i^{техн\ приб\ н-б}$ – технологически необходимое время от момента прибытия i -го почтово-багажного поезда до момента начала работы с ним маневрового локомотива;

$t_i^{раб\ от\ н-б}$ – время работы локомотива с почтово-багажным составом, включая время передвижения локомотива под состав и возвращение его на место стоянки при отправлении поезда;

$t_i^{нач\ раб\ н-б\ по\ отпр}$ – наибольшее на числовой оси (самое позднее) технологически обоснованное время начала работы с i -м почтово-багажным поездом по его отправлению (5):

$$t_i^{нач\ раб\ н-б\ по\ отпр} = t_i^{от\ н-б} - t_i^{техн\ отпр\ н-б}, \quad (5)$$

где $t_i^{техн\ отпр\ н-б}$ – технологически необходимое время от момента окончания работы с i -м почтово-багажным поездом до момента его отправления;

$t_i^{нач\ раб\ приб}$ – наименьшее на числовой оси (самое раннее), технологически обоснованное время начало работы с составом i -го пассажирского поезда при перестановке его с ПОП (6):

$$t_i^{нач\ раб\ приб} = t_i^{пр} + t_i^{высад}, \quad (6)$$

где $t_i^{высад}$ – время высадки пассажиров из состава i -го пассажирского поезда (при условии, что оно является лимитирующим по отношению к параллельно выполняемым с составом техническими операциями);

$t_i^{нач\ раб\ отпр}$ – наибольшее на числовой оси (самое позднее) технологически обоснованное время начала работы с составом i -го пассажирского поезда по перестановке его на приемо-отправочные пути (7):

$$t_i^{нач\ раб\ отпр} = t_i^{от} - t_i^{посад} - t_i^{техн}, \quad (7)$$

где $t_i^{посад}$ – время посадки пассажиров в состав i -го пассажирского поезда;

$t_i^{техн}$ – технологически необходимое время от момента окончания посадки пассажиров до момента отправления.

Кроме того, если на станции могут быть враждебности при перемещении составов с приемо-отправочных путей и обратно, их необходимо учитывать в качестве дополнительного времени ожидания (8):

$$T_{ож} = M[n_{оч}^{перес}] \cdot t_{зан}^{перес}. \quad (8)$$

Например, при $t_{зан}^{перес} = 0,2 \text{ час}$,

$$M[n_{оч}^{перес}] = \left(0,075 + \frac{0,1}{0,2} \right) \Psi_{перес} = 0,575 \Psi_{перес}$$

Если $\Psi_{перес} = 0,8$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,46$,
 $T_{ож} = 0,092 \text{ час} = 5,5 \text{ мин.}$

Если $\Psi_{перес} = 0,7$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,4025$,
 $T_{ож} = 0,08 \text{ час} = 4,8 \text{ мин.}$

Если $\Psi_{перес} = 0,76$, то $M[n_{оч}^{перес}] = 0,437$,
 $T_{ож} = 0,087 \text{ час} = 5,2 \text{ мин.}$

Данное время в случае необходимости следует учитывать при расчете общего времени перемещения составов.

Показатели работы отдельно взятой «системы обслуживания», под которой понимается передвижение составов с приемо-отправочных путей и обратно при значительной загрузке маршрутов движения, могут быть рассчитаны по методике, изложенной в [10–12] дифференцированно для различных временных периодов в зависимости от загрузки мест пересечения маршрутов, включая периоды «сверх загрузки», т.е. когда потребности в использовании таких мест превышают их пропускную способность (9):

$$M[n_{оч}^{перес}] = \begin{cases} 0,1(1 + 0,75 \frac{t_{зан}^{перес}}{t_{зан}}) \Psi_{перес}, \text{ при } 0 \leq \Psi_{перес} \leq 0,8 \\ \frac{2(\Psi_{перес}^2 - \Psi_{перес} + 0,2)(1 + 0,75 \frac{t_{зан}^{перес}}{t_{зан}})}{t_{зан}^{перес}}, \text{ при } 0,8 \leq \Psi_{перес} \leq 1 \\ \frac{20(\Psi_{перес}^2 - 1,75 \Psi_{перес} + 0,77)}{t_{зан}^{перес}} + 15(\Psi_{перес}^2 - 2,3 \Psi_{перес} + 1,32), \\ \text{при } 1 < \Psi_{перес} \leq 1,2 \end{cases}, \quad (9)$$

где $M[n_{оч}^{перес}]$ – математическое ожидание (среднее количество) составов пассажирских поездов, ожидающих дополнительное время, связанное с враждебностью;

$\Psi_{перес}$ – коэффициент загрузки «системы обслуживания» (враждебных маршрутов передвижения составов);



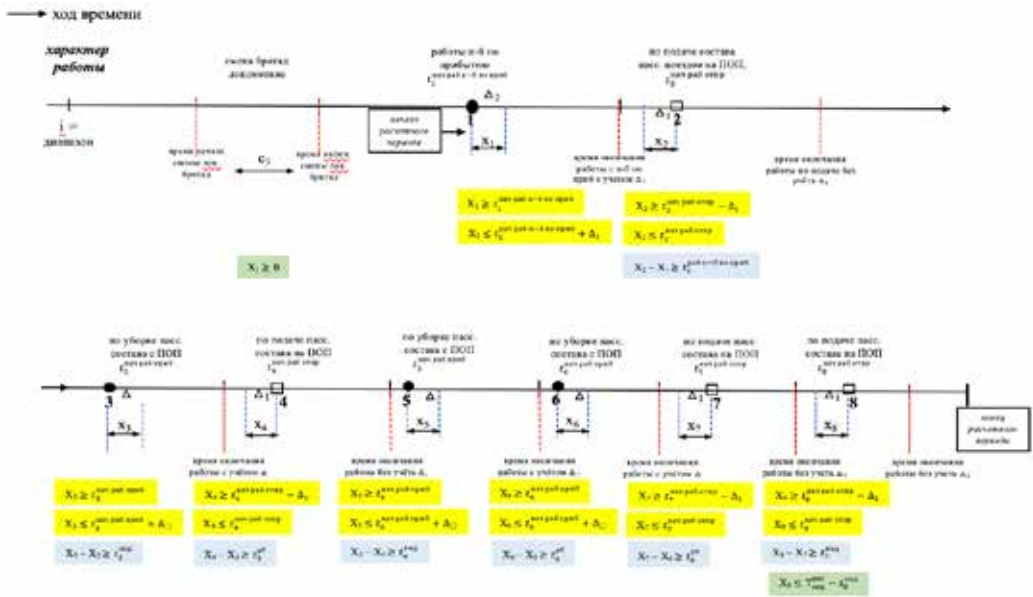


Рис. 4. Фрагмент размещения искомых величин на временной оси [выполнено авторами].

$t_{\text{зан}}^{\text{перс}}$ – среднее время занятия враждебного маршрута при передвижении составов, час. Длительность периодов дифференцированного расчета продолжительности ожидания перестановки может быть меньше расчетных периодов работы маневровых локомотивов в зависимости от изменения интенсивности занятости маршрутов с враждебностями и определяется для конкретных пассажирских станций.

Поставим задачу для одного маневрового локомотива.

Локомотив должен за рассматриваемый период времени выполнить работу по уборке (перестановке) (n) пассажирских составов на пути экипировки (отстоя), по подаче (перестановке) их на приемо-отправочные пути, выполнить работу с (m) почтово-багажными поездами по прибытию и отправлению.

При этом сумма отклонений фактически реализуемых времён начала работы с составами от диктуемых технологическими процессами работы с составами пассажирских и почтово-багажных поездов и расписаниями их прибытия и отправления должны быть минимальными, что обеспечит оптимальный баланс занятости приемо-отправочных путей и путей отстоя при безусловном выполнении заданного объема работы.

Таким образом, данная задача является задачей линейного программирования по нахожде-

нию минимума целевой функции при ограничениях типа равенств и неравенств [13; 14].

Отсутствие решения этой задачи при заданных исходных данных будет говорить о невозможности выполнения заданного объема работы для локомотива при фиксированном расписании.

Представим задачу математически при приведенных выше обозначениях.

Введем нумерацию времён начала работы с прибывающими и отправляющимися пассажирскими и почтово-багажными поездами [15]. Здесь и далее под i -м прибывающим (отправляющимся) поездом будем понимать не конкретный состав поезда, который прибывает на станцию (отправляется со станции), а поезд, который прибывает на станцию (отправляется со станции) по i -ой «нитке» и обслуживается на станции в соответствии с принятой технологией работы с поездом, прибывающим на станцию (отправляющимся со станции) по конкретному назначению i -ой «нитки» графика движения. Отсчет можно вести с любого момента в соответствии с течением времени.

Неизвестными (исковыми) величинами в задаче будут являться фактически рекомендованные времена начала работы с составами пассажирских и почтово-багажных поездов (рис. 3).

Общее минимальное число неизвестных равно $(2m + 2n)$ в зависимости от величины

рассматриваемого периода времени, то есть $x_i, i = 1, \dots, 2(m+n)$ (здесь принята нумерация, определенная выше).

Ограничениями в задаче будут:

1. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по уборке составов пассажирских поездов с приемо-отправочных путей (10):

$$t_i^{\text{нач раб приб}} \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб приб}} + \Delta, \quad (10)$$

где Δ – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, в течение которого состав должен освободить приемо-отправочные пути. Эта величина может быть установлена дифференцировано для различных временных отрезков или для каждого поезда в зависимости от фактической занятости путей отстоя в те или иные периоды времени.

2. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по подаче состава пассажирского поезда на приемо-отправочные пути (11):

$$t_i^{\text{нач раб отпр}} - \Delta_1 \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб отпр}}, \quad (11)$$

где Δ_1 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, допускающий заблаговременную перестановку состава с пути отстоя (экипировки) для последующего отправления со станции. Эта величина также может быть установлена дифференцировано в зависимости от фактической занятости приемо-отправочных путей, а также расписания прибытия и отправления поездов, в первую очередь транзитных.

Принятое при расчетах значение $\Delta = 0$ и или $\Delta_1 = 0$ означает, что ввиду плотной занятости приемо-отправочных путей (путей отстоя) отклонение от технологического графика работы с составами пассажирских поездов не допускается.

3. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива с прибывшим почтово-багажным поездом (12):

$$t_i^{\text{нач раб п-б приб}} \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб п-б приб}} + \Delta_2, \quad (12)$$

где Δ_2 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, в течение которого должна быть начата работа с почтово-багажным поездом по прибытию.

4. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива по формированию, перестановке состава поч-

тово-багажного поезда при его отправлении на станции (13):

$$t_i^{\text{нач раб п-б отпр}} - \Delta_3 \leq x_i \leq t_i^{\text{нач раб п-б отпр}}, \quad (13)$$

где Δ_3 – максимально возможный (установленный волевым порядком или другими соображениями) интервал времени, допускающий заблаговременное начало работы с почтово-багажным поездом по отправлению. Пояснения к величинам Δ и Δ_1 в полной мере могут относиться и к величинам Δ_2 и Δ_3 .

5. Для всех времён, определяющих начало технического обслуживания, смены бригад маневрового локомотива (14):

$$t_i^{\text{ок обл}} = t_i^{\text{нач обл}} + C_j, \quad (14)$$

где C_j – фиксированное время выполнения технического обслуживания, смены локомотивных бригад для j -ой операции.

Эти величины переменными не являются, заданы как исходная информация: $t_i^{\text{нач обл}}$.

В некоторых случаях может быть допущено незначительное смещение во времени значений $t_i^{\text{нач обл}}$ и длительности самого обслуживания.

Следующая группа ограничений касается обеспечения возможности начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом.

6. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом по уборке (перестановке) пассажирского состава с приемо-отправочных путей на пути экипировки (отстоя) (15):

$$x_i + t_{\text{уб } i} \leq x_{i+1}. \quad (15)$$

7. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом по подаче (перестановке) пассажирского состава с путей отстоя на приемо-отправочные пути (16):

$$x_i + t_{\text{под } i} \leq x_{i+1}. \quad (16)$$

Ограничения 6, 7, 8 и 9 обеспечивают необходимую «разреженность» в работе локомотива.

8. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со следующим составом после завершения работы с предыдущим составом (почтово-багажным) по прибытию (17):

$$x_i + t_i^{\text{раб п-б приб}} \leq x_{i+1}. \quad (17)$$

9. Для всех времён, определяющих время начала работы маневрового локомотива со



Таблица 1

Решение при $\Delta = 10$	
$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$	$x_1 = 0,$
$x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$	$x_2 = 60,$
$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20;$	$x_3 = 80,$
$x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$	$x_4 = 100,$
$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20;$	$x_5 = 120,$
$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20;$	$x_6 = 140,$
$x_7 \geq 175 - 10, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20;$	$x_7 = 170,$
$x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20;$	$x_8 = 190,$
$x_8 \leq 240 - 20 = 220.$	

следующим составом после завершения работы с предыдущим составом (почтово-багажным) по отправлению (18):

$$x_i + t_i^{\text{раб н-б отпр}} \leq x_{i+1}. \quad (18)$$

10. Для всех времён, определяющих время перед началом технического обслуживания (смены бригад) локомотива (ф-ла 19):

$$x_i + t_i^{\text{раб (приб) отпр}} \leq T_{\text{пер}}^{\text{рас}}. \quad (19)$$

Ограничение 10 аналогичным образом (как и все ограничения этой группы) определяет возможность завершения работы с составами до начала технологического перерыва в работе локомотива.

Рассмотрим конкретный пример, соответствующий общей схеме прибытия и отправления поездов, приведённой на рис. 4.

Исходные данные:

$$t_i^{\text{под}} = t_i^{\text{уб}}, i = 2, \dots, 8 \rightarrow 20 \text{ мин.}$$

Расчет приведен при $\Delta = \Delta_1 = 0, 5, 10$ мин.

$$t_1^{\text{раб пр н-б}} = 60 \text{ мин.}$$

$$T_{\text{пер}}^{\text{рас}} = 240 \text{ мин.}$$

При этом формальная загрузка маневрового локомотива равна 0,83, а время непосредственной работы 200 мин.

Аналитически критерий данной задачи имеет следующий вид (20):

$$f(x_i, i = 1, \dots, 2(m+n)) = \min \left[\sum_{i \in M_{\text{под}}} (-x_i + t_i^{\text{нач раб отпр}}) + \sum_{i \in M_{\text{уб}}} (-t_i^{\text{нач раб пр}} + x_i) \right], \quad (20)$$

где $M_{\text{под}}$ – подмножество натуральных чисел, определяющих в числовой последовательности номера работ маневрового локомотива по подаче составов пассажирских поездов на приемо-отправочные пути и работ с почтово-багажными поездами по отправлению за

расчетный период;

$M_{\text{уб}}$ – подмножество натуральных чисел, определяющих в числовой последовательности номера работ маневрового локомотива по уборке составов пассажирских поездов с приемо-отправочных путей и работ с почтово-багажными поездами по прибытию за расчетный период.

В данном примере (21):

$$f(x_i, i = 1, \dots, 8) = \min \left[\sum_{i=2,4,7,8} (-x_i + t_i^{\text{нач раб отпр}}) + \sum_{i=1,3,5,6} (-t_i^{\text{нач раб пр}} + x_i) \right]. \quad (21)$$

$$t_1^{\text{нач раб приб}} = 0; t_2^{\text{нач раб отпр}} = 65; t_3^{\text{нач раб приб}} = 80;$$

$$t_4^{\text{нач раб отпр}} = 110; t_5^{\text{нач раб приб}} = 120; t_6^{\text{нач раб приб}} = 140;$$

$$t_7^{\text{нач раб отпр}} = 175; t_8^{\text{нач раб отпр}} = 190.$$

$$T_{\text{пер}}^{\text{рас}} = 240 \text{ мин.}$$

Ограничения при $\Delta = 10$:

$$x_1 \geq 0;$$

$$x_1 \geq 0, x_1 \geq 0, x_1 \leq \Delta;$$

$$x_2 \geq 65 - \Delta, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$$

$$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + \Delta, x_3 - x_2 \geq 20;$$

$$x_4 \geq 110 - \Delta, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$$

$$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + \Delta, x_5 - x_4 \geq 20;$$

$$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + \Delta, x_6 - x_5 \geq 20;$$

$$x_7 \geq 175 - \Delta, x_7 \leq 175, x_7 - x_6 \geq 20;$$

$$x_8 \geq 190 - \Delta, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20; x_8 \leq 240 - 20 = 220.$$

Критерий:

$$(65 - x_2) + (110 - x_4) + (175 - x_7) + (190 - x_8) + (-0 + x_1) + (-80 + x_3) + (-120 + x_5) + (-140 + x_6).$$

Приведённый вид критерия и ограничений (при фиксированном значении величины Δ и конечных значениях константы):

$$\min: x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 + x_6 - x_7 - x_8 + 200.$$

Таблица 2

Решение при $\Delta = 10$.	
$x_1 \geq 0, x_1 \leq 10$	$x_1 = 0,$
$x_2 \geq 65 - 10, x_2 \leq 65, x_2 - x_1 \geq 20;$	$x_2 = 60,$
$x_3 \geq 80, x_3 \leq 80 + 10, x_3 - x_2 \geq 20;$	$x_3 = 80,$
$x_4 \geq 110 - 10, x_4 \leq 110, x_4 - x_3 \geq 20;$	$x_4 = 100,$
$x_5 \geq 120, x_5 \leq 120 + 10, x_5 - x_4 \geq 20;$	$x_5 = 120,$
$x_6 \geq 140, x_6 \leq 140 + 10, x_6 - x_5 \geq 20;$	$x_6 = 140,$
$x_7 \geq 170 - 10, x_7 \leq 170, x_7 - x_6 \geq 20;$	$x_7 = 160,$
$x_8 \geq 190 - 10, x_8 \leq 190, x_8 - x_7 \geq 20;$	$x_8 = 180,$
$x_8 \leq 200 - 20 = 180.$	

Решение приведено в таблице 1.

Минимальное значение критерия: $\min f = 20$.

Достаточное условие без разрешения сдвиги ($\Delta = 0$) не выполняется. При разрешенной сдвиге $\Delta = 5$ решение задачи при заданных исходных данных также отсутствует.

Изменим исходные данные, а именно уменьшим расчетный период: $T_{\text{пер}}^{\text{рас}} = 200$ мин и сдвинем начало работы с составом отправляющегося пассажирского поезда $t_7^{\text{нач раб отпр}} = 170$ мин.

Решение приведено в таблице 2.

Минимальное значение критерия: $f = 35$.

В этом случае $\psi_{\text{ман}} = 1$. Локомотив работает в режиме максимальной загрузки и любое опоздание поезда может «сломать» весь график прибытия-отправления пассажирских поездов, а время дополнительного занятия приемо-отправочных путей пассажирскими составами возрастает на 75 %.

При работе нескольких локомотивов необходимо распределить работу между ними согласно следующему алгоритму:

1. Предварительно определить необходимое (потребное) число маневровых локомотивов (22):

$$M_{\text{лок}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\text{раб}} + \sum T_{\text{пер}}^{\text{сум}}}{1440}, \quad (22)$$

где n – количество всех работ маневровых локомотивов за сутки;

$t_i^{\text{раб}}$ – продолжительность i -ой работы локомотива;

$\sum T_{\text{пер}}^{\text{сум}}$ – суммарное время (за сутки) перерывов в работе маневровых локомотивов, связанных с операцией их технического осмотра и сменой бригад (возможно потребуются варианты расчетов, т.к. технический осмотр проводится не каждые сутки).

2. Все времена начала работ разметить на суточной временной шкале и осуществить их перенос применительно к расчетным периодам для первого маневрового локомотива (см. ранее указанные правила).

3. Для каждого расчетного периода первого маневрового локомотива на основании аналитического достаточного условия (формула 3) провести изъятие и размещение работы локомотива с временной шкалы первого на временную шкалу второго по условию (23):

$$t_{\text{перенос } i}^{\text{раб}} = \max_{i=2, \dots, k} (t_{i-1}^{\text{нач раб}} + t_{i-1}^{\text{раб}} - t_i^{\text{нач раб}}). \quad (23)$$

Таким образом, осуществляется перенос работ, находящихся в наиболее «стесненных» условиях. Такое перемещение для каждого расчетного периода (отдельно) производить до тех пор, пока не будет выполнено аналитически достаточное условие.

4. Итерационно производить перемещение с временной оси локомотива на временную ось последующего локомотива до тех пор, пока работы не будут размещены относительно равномерно на всех временных осях всех используемых локомотивов.

5. Распределение работы необходимо подтверждать решением задачи для каждого локомотива и для каждого его расчетного периода по определенному разрешенному смещению времён начала работ, связанное с дополнительным занятием приемо-отправочных путей.

В условиях обязательного выполнения маневровыми локомотивами работы по выводу прибывших на приемо-отправочные пути станции пассажирских поездов и перестановке пассажирских поездов на приемо-отправочные пути на отправление при высокой среднесуточной загрузке приходится прибегать к:



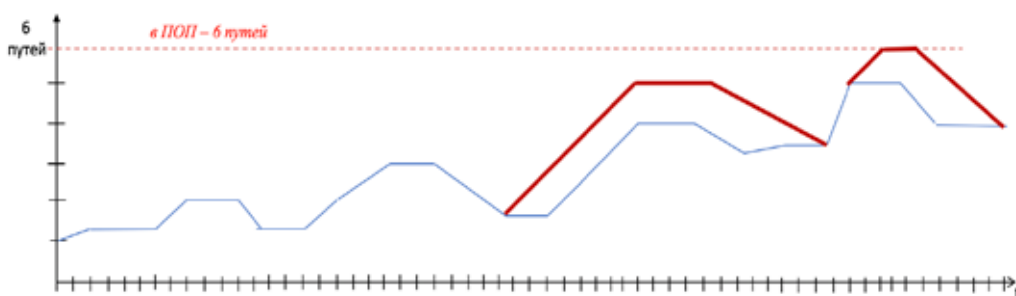


Рис. 5. Временная ось.

- Линия соответствует занятости путей без разрешенного смещения (локомотив не выдерживает график);
- Линия соответствует занятости путей с разрешенным смещением (локомотив выдерживает график).

– более позднему времени уборки составов (по отношению к технологически обоснованному) с приемо-отправочные пути;

– более раннему времени подачи составов (по отношению к технологически обоснованному) на приемо-отправочные пути.

Это приводит к увеличенному (за сутки) времени суммарного занятия составами приемо-отправочных путей.

Такое увеличение в отдельные периоды времени может привести к нехватке приемо-отправочных путей для выполнения графика прибытия и отправления как конечных, так и проходящих (транзитных) поездов.

Поэтому после определения времён начала работы маневровых локомотивов с конечными составами необходимо проводить проверку достаточности емкости приемо-отправочных путей, для выполнения общего графика прибытия и отправления пассажирских поездов на станции.

Исходными данными для такой проверки являются:

1. Для факта увеличения числа занятых путей:

- время прибытия транзитных (проходящих) и конечных пассажирских поездов, скорректированное на время подготовки маршрута приема поезда на путь $t_i^{\text{прох пр}}$, $t_i^{\text{кон пр}}$;
- время фактического начала работы маневрового локомотива по выводу состава на приемо-отправочных путей, скорректированного на время заезда локомотива под выводимый состав:

$$t_i^{\text{кон отпр}}(x_i + t_{\text{заезд}}).$$

2. Для факта уменьшения числа занятых путей:

- время отправления проходящих и конечных пассажирских поездов, скорректированных на время освобождения пути после трогания поезда $t_i^{\text{прох отпр}}$, $t_i^{\text{кон отпр}}$;

– время фактического начала работы маневрового локомотива по уборке состава конечного пассажирского поезда с приемо-отправочных путей, скорректированного на время заезда локомотива под выводимый состав: $t_i^{\text{кон пр}}(x_i + t_{\text{заезд}})$ и на время освобождения пути после трогания поезда.

Все указанные времена наносятся на временную ось (на сутки или на расчетный период) в возрастающем порядке и на графике отображается изменение числа занятых путей во времени (с шагом $t = 6$ мин), временная ось приведена на рис. 5.

Если в отдельные промежутки времени превышает заданное число путей (в данном примере – 6), тогда график тоже не будет соблюдаться и значит надо менять расписание прибытия-отправления пассажирских поездов.

ВЫВОДЫ

Предложенная в работе методика направлена на математическую формализацию процесса определения рациональной последовательности в работе маневровых локомотивов с составами пассажирских поездов на станциях. Она может быть использована при решении целого ряда эксплуатационных задач, в том числе:

- при корректировке результатов расчёта количества маневровых локомотивов на пассажирской технической станции в условиях их предельных загрузок;

- при совершенствовании и корректировке расписания прибытия и отправления пассажирских поездов при назначении пассажирских дополнительных поездов в периоды массовых перевозок;

- повышения эффективности работы маневровых локомотивов с учётом использования дополнительных резервов, заложенных в периодах отсутствия занятости приемо-отправочных путей;

- определения резервов в работе маневровых локомотивов при возможных опозданиях прибытия пассажирских поездов на станцию.

Методика позволяет решать данные задачи как фрагментарно в отдельные периоды времени, так и для «суточного отрезка».

В работе формализованы понятия: необходимое условие и достаточное условие выполнения маневровыми локомотивами заданного объема работы, как в целом, так и для отдельных наиболее загруженных периодов в прибытии и отправлении поездов.

Использование аппарата линейного программирования позволяет решать как конкретные задачи, так и проводить исследования по оценке уровня влияния различных факторов на показатели работы пассажирских и пассажирских технических станций, определению резервов использования маневровых локомотивов и их рациональному использованию в условиях проблемы дефицита локомотивов маневрового движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абдуллаев И. С. Перспективы пассажирских железнодорожных станций в мегаполисах // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 5 (60). – С. 160–164. EDN: VMBQDL.

2. Анисимкова Н. И. Краткий анализ развития отечественных и зарубежных пассажирских станций // Аллея науки. – 2021. – Т. 1. – № 1 (52). – С. 281–286. EDN: VDIGRV.

3. Метёлкин П. В., Лебедева Ю. А., Мурашев В. А. Состояние и перспективы развития перевозок пассажиров дальнего следования в Московском железнодорожном узле // Вестник транспорта. – 2007. – № 6. – С. 21–26. EDN: PWKURP.

4. Персианов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.

5. Пехтерев Ф. С. Пути улучшения взаимодействия транспортных систем «Пространства 1520» // Евразия-Вести. – 2012. – № 4. [Электронный ресурс]: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2012-04a21&ysclid=m4k08d724c10966456>. Доступ 15.03.2024.

6. Кочнев Ф. П., Максимович Б. М., Тихонов К. К., Черномордик Г. И. Организация движения на железнодорожном транспорте. – 3-е, изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1969. – 472 с.

7. Коробкин С. Е. Модернизация станционной инфраструктуры пассажирского комплекса ОАО «РЖД» // Вестник университета. – 2013. – № 2. – С. 52–56. EDN: PYKJX.

8. Вентцель Е. С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 522 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/drARRZJ8UHtCU>. Доступ 22.12.2024.

9. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения / пер. с фр. В. И. Неймана и В. П. Швальба; под ред. И. Н. Коваленко – М.: Мир, 1965. – 302 с.

10. Минаков П. А. Использование дифференциальных уравнений для определения технико-технологических параметров работы сортировочной станции // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 3. – С. 19–24. EDN: PBUCAL.

11. Минаков П. А. Взаимодействие технологических линий в парке приема сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 9. – С. 23–25. EDN: PEMRKV.

12. Минаков П. А. Обоснование комплекса технико-технологических параметров работы сортировочной станции в условиях высоких загрузок / Автореф... дис... канд. техн. наук. – М.: МГУПС (МИИТ), 2012. – 24 с. EDN: SVCXTV.

13. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применения / Пер. с англ. Г. Н. Андрианова [и др.]; Общая ред. и предисл. Н. Н. Воробьева. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/nk9t97fW562M2?ysclid=m4k0p85hmk63162567>. Доступ 15.03.2024.

14. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 171 с.

15. Чередников И. К. Особенности работы пассажирских станций с грузовыми и почтово-багажными вагонами // Молодежная наука: Труды XXV Международной научно-практ. конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. Том 2. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС, 2021. – С. 252–255. EDN: UOZDIK. ●

Информация об авторах:

Куликова Екатерина Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальными системами, директор Фонда целевого капитала Российского университета транспорта, Москва, Россия, iulit_kulikova@inbox.ru.

Минаков Павел Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, pavelminakovrvc@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023, одобрена после рецензирования 19.03.2024, принята к публикации 22.03.2024.

