

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 132–150
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>
UDC 656.2

METHODOLOGY FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS OF PASSENGER TRAIN FORMATION AND MOVEMENT

*V. Guliyev**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Vusal Guliyev — master student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© V. Guliyev

Abstract. This study addresses the problem of optimizing the parameters of passenger train formation and movement on railway transport. The relevance of the topic is determined by the need to improve transportation efficiency, passenger comfort, and reduce operational costs. At the current stage of railway development, there is a lack of comprehensive methods for train composition formation considering different types of carriages, train weight, and speed. The aim of the study is to determine optimal parameters for passenger train formation and operation to ensure rational resource use and economic efficiency. The following tasks were set: analysis of existing train formation methods, collection and processing of statistical data, development of a methodology for optimizing train composition and operation, mathematical modeling, and comparative analysis of results. The research revealed dependencies between train composition, weight, operation mode, and economic efficiency. Recommendations for train formation with different carriage types were developed, allowing cost reduction and improved passenger comfort. Optimizing train formation and operation parameters confirms the hypothesis that efficiency can be increased through a systematic approach. The results can be applied in railway practice and further scientific studies in transportation modeling.

Keywords: passenger train, composition, optimization, speed, economic efficiency, railway transport

For citation: V. Guliyev. Methodology for Determining Optimal Parameters of Passenger Train Formation and Movement // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 132–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЖОЛАУШЫЛАР ПОЙЫЗДАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖӘНЕ ҚОЗҒАЛЫС ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕМЕСІ

*В.Н. Гулиев**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Вусал Гулиев — магистрант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© В.Н. Гулиев

Аннотация. Бұл зерттеуде теміржол көлігінде жолаушылар пойыздарының құрамын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру мәселесі қарастырылады. Тақырып өзектілігі тасымалдау тиімділігін арттыру, жолаушыларға ыңғайлылық жасау және эксплуатациялық шығындарды азайту қажеттілігімен түсіндіріледі. Қазіргі теміржол саласын дамыту кезеңінде әртүрлі вагон категориялары, пойыздың салмағы және жылдамдығын ескеретін кешенді әдістер жеткіліксіз. Зерттеудің мақсаты – ресурстарды тиімді пайдалану және экономикалық тиімділікті қамтамасыз ету үшін жолаушылар пойыздарын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: пойыз құрамын қалыптастырудың қазіргі әдістерін талдау, статистикалық деректер жинау және өңдеу, құрам мен қозғалыс режимін оңтайландыру әдістемесін әзірлеу, математикалық модельдеу және нәтижелерді салыстырмалы талдау. Зерттеу пойыз құрамының, салмағының, қозғалыс режимінің және экономикалық тиімділіктің өзара байланысын көрсетті. Әртүрлі вагон категориялары бар пойыздарды қалыптастыру бойынша ұсыныстар жасалды, бұл эксплуатациялық шығындарды азайтуға және жолаушыларға ыңғайлылықты арттыруға мүмкіндік береді. Пойыз құрамын және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру тиімділікті жүйелі тәсіл арқылы арттыру мүмкіндігін растайды. Алынған нәтижелер теміржол тәжірибесінде және көліктік модельдеу саласындағы ғылыми зерттеулерде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: жолаушылар пойызы, құрам, оңтайландыру, жылдамдық, экономикалық тиімділік, теміржол көлігі

Дәйексөздер үшін: В.Н. Гулиев. Жолаушылар пойыздарының құрамын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру әдістемесі // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 132–150 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

В.Н. Гулиев*

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Вусал Гулиев — магистрант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© В.Н. Гулиев

Аннотация. В настоящем исследовании рассматривается проблема оптимизации параметров формирования и движения пассажирских поездов на железнодорожном транспорте. Актуальность темы определяется необходимостью повышения эффективности перевозок, улучшения комфортности для пассажиров и снижения эксплуатационных затрат. На современном этапе развития железнодорожной отрасли наблюдается недостаточная разработанность комплексных методов формирования состава поездов с учетом различных категорий вагонов, массы поезда и скорости движения. Цель исследования заключается в определении оптимальных параметров формирования и движения пассажирских поездов, обеспечивающих рациональное использование ресурсов и экономическую эффективность перевозок. Для достижения цели поставлены следующие задачи: анализ существующих методов формирования поездов, сбор и

обработка статистических данных, разработка методики оптимизации состава и режима движения, математическое моделирование и сравнительный анализ полученных результатов. В результате проведенного исследования выявлены зависимости между составом поезда, его массой, режимом движения и экономической эффективностью перевозок. Разработаны рекомендации по формированию поездов с различными категориями вагонов, позволяющие снизить эксплуатационные затраты и повысить комфорт пассажиров. Оптимизация параметров формирования и движения пассажирских поездов подтверждает гипотезу о возможности повышения эффективности перевозок при системном подходе. Полученные результаты могут быть использованы в практике железнодорожных перевозок и для дальнейших научных исследований в области транспортного моделирования.

Ключевые слова: пассажирский поезд, состав, оптимизация, скорость, экономическая эффективность, железнодорожный транспорт

Для цитирования: В.Н. Гулиев. Методика определения оптимальных параметров формирования и движения пассажирских поездов // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. №. 89. Стр. 132–150. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях динамичного развития железнодорожного транспорта и увеличения пассажиропотоков возникает необходимость совершенствования процессов формирования и движения пассажирских поездов. Анализ существующих исследований показывает, что до настоящего времени вопросы оптимизации состава поездов и режимов их движения изучены недостаточно. В частности, большинство работ посвящено либо техническим аспектам эксплуатации локомотивов, либо пассажирскому комфорту, но комплексное рассмотрение взаимосвязи состава поезда, веса, скорости движения и экономической эффективности встречается редко.

Проблемная ситуация усугубляется отсутствием унифицированных методик расчета оптимальной композиции поездов с учетом реальных эксплуатационных условий и разнообразия категорий вагонов. Появление новых типов вагонов и модернизированных локомотивов создает необходимость пересмотра существующих рекомендаций и разработки научно обоснованных подходов к формированию составов. Таким образом, выбор темы исследования обусловлен актуальной практической задачей повышения эффективности пассажирских перевозок, а также дефицитом комплексных научных исследований в этой области.

Актуальность исследования определяется как теоретической, так и практической значимостью. Теоретическая значимость заключается в возможности уточнения существующих моделей формирования поездов и расширения научного знания о взаимосвязи параметров состава с эксплуатационными и экономическими показателями. Практическая значимость проявляется в потенциале внедрения разработанных рекомендаций на железнодорожных линиях, что позволит повысить эффективность использования подвижного состава, снизить эксплуатационные затраты и улучшить качество обслуживания пассажиров (Дмитренко, 2006: 34–38; Вахитова, 2006а: 96–98; Вахитова, 2006б: 294–298; Кобдилов, 2007: 263–266; Касымов, 2006: 49–52; Тихомиров, 1979: 67–234; Мустапаева, 2006: 75–81).

Объект исследования — процессы формирования и движения пассажирских поездов на железнодорожном транспорте. Предмет исследования — параметры состава пассажирских поездов, включая количество и тип вагонов, массу поезда, режим движения и их влияние на экономическую эффективность перевозок и комфорт пассажиров.

Цель исследования — определить оптимальные параметры формирования и движения пассажирских поездов, подтверждающие гипотезу о возможности повышения

экономической эффективности перевозок при системном анализе состава поезда и режима его движения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- провести анализ существующих подходов к формированию пассажирских поездов и выявить их ограничения;
- осуществить сбор и обработку исходных данных о пассажирских составах, локомотивах и инфраструктуре;
- разработать методику оптимизации состава поезда с учетом категорий вагонов, веса и скорости движения;
- провести математическое моделирование и графоаналитический анализ вариантов формирования поездов;
- сравнить полученные результаты с нормативными требованиями и оценить практическую применимость предложенных решений.

В исследовании использовались комплексные методы, включающие:

- анализ научной литературы и нормативных документов;
- сбор и систематизацию статистических и эксплуатационных данных;
- математическое моделирование состава поезда и режима его движения;
- графоаналитический метод для анализа зависимостей экономических и эксплуатационных показателей;
- сравнительный анализ результатов с существующими рекомендациями.

Выдвигается гипотеза: оптимизация состава и режима движения пассажирских поездов возможна при системном анализе технико-экономических показателей и математическом моделировании с учетом категорий вагонов, массы поезда и скорости движения.

Научное значение исследования заключается в уточнении методов формирования поездов и выявлении новых закономерностей влияния состава и скорости движения на экономические и эксплуатационные показатели. Практическое значение работы состоит в возможности внедрения результатов на железнодорожных линиях для повышения эффективности перевозок, рационального распределения ресурсов и улучшения обслуживания пассажиров.

Результаты и обсуждение

Композиция состава пассажирского поезда устанавливает число и порядок размещения вагонов разных категорий (плацкартных, купейных, мягких и др.) и определяет, с одной стороны, комфорт, предоставляемый пассажирам, с другой, — расчетную населенность и вес поезда, а, следовательно, скорость поездов, размеры их движения и расходы железных дорог, связанные с пассажирскими перевозками. Поэтому выбор композиции состава пассажирского поезда целесообразно выполнять одновременно с определением веса и скорости.

Как правило, композиция состава поезда — это 1–2 мягких, 5–8 купейных, 7–8 не купейных с плацкартными или общими местами, а также вагон-ресторан, багажные и почтовые вагоны. При этом населенность состава зависит от категории поезда и изменяется от 500 до 1100 пас.

Возможны несколько вариантов композиций составов, для каждого из которых в соответствии с числом мест в каждом вагоне и весом определяют населенность и весовую норму поезда. При этом нагрузку от пассажиров и ручной клади на вагон принимают для мягких вагонов 3 т, купейных — 4 т, не купейных плацкартных — 6 т, не купейных не плацкартных и межобластных — 6 т. На выбор наилучшей композиции, а следовательно, весовой нормы и скорости поездов оказывает влияние целый ряд факторов, в том числе мощность локомотива, тип профиля пути, конструкционные скорости подвижного состава

и др. Важные факторы — это скорость доставки пассажиров и денежные затраты, связанные с выполнением перевозок.

Для нахождения оптимальных веса и скорости поездов должны быть выполнены технико-экономические расчеты. При этом необходимо учитывать затраты на потребный парк локомотивов, содержание локомотивных бригад, электроэнергию (топливо) и ремонтные работы, потребное усиление пропускной способности линии, удлинение станционных путей и платформ, развитие вагонных экипировочных депо и др. (Правдин, 1990: 319–320).

При заданном техническом оснащении линии наибольшее влияние на скорость и вес оказывает стоимость 1 пассажиро-ч и 1 т-км работы локомотива. Оптимальные весовые нормы и скорости движения поездов могут быть установлены для возможных категорий поездов и их композиций при различной расчетной населенности, заданной длине станционных путей и мощности локомотива по минимуму приведенных затрат, учитывающих изменяющиеся в различных вариантах капитальные вложения и эксплуатационные расходы.

Приведенные затраты (тг/поезд)

$$E = R_{\text{мех}} C_{\text{т-км}} + \frac{L}{\beta_m v_x} C_{\text{п-ч}}, \quad (1)$$

где: $R_{\text{мех}}$ — работа локомотива, ткм;

$C_{\text{т-км}}$ — затраты на 1 ткм, тг;

$C_{\text{п-ч}}$ — приведенная стоимость 1 поезд-час с учетом оценки 1 пас-час, тг;

L — длина направления, км;

v_x — ходовая скорость, км/ч;

β_m — коэффициент маршрутной скорости пассажирского поезда, зависящий от числа и продолжительности стоянок поезда (0,80–0,95).

Работа локомотива (ткм)

$$R_{\text{мех}}^{\text{л}} = (P + Q)(\omega_0 + i_{\text{э}})10^{-3} L + 3,8(P + Q)(\alpha v_x)^2 10^{-6} K_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где: P — вес локомотива;

Q — вес состава, брутто;

ω_0 — основное удельное сопротивление движению поезда;

$i_{\text{э}}$ — эквивалентный уклон на расчетном направлении;

α — отношение скорости начала торможения к ходовой скорости (0,80–0,96);

$K_{\text{ост}}$ — число остановок поезда.

Приведенная стоимость 1 поезд-час любого пассажирского поезда (тг)

$$C_{\text{п-ч}} = \alpha_{\text{л}} C_{\text{л-ч}}^{\text{л}} + \beta_{\text{л}} C_{\text{бр-ч}}^{\text{л}} + \beta_{\text{п}} C_{\text{бр-ч}}^{\text{п}} m + C_{\text{пасс-ч}} a_{\text{п}} + m C_{\text{в-ч}}, \quad (3)$$

где: $C_{\text{л-ч}}$, $C_{\text{в-ч}}$ — приведенная стоимость соответственно 1 локомотиво-час и 1 вагоно-час, тг;

$C_{\text{бр-ч}}^{\text{л}}$, $C_{\text{бр-ч}}^{\text{п}}$ — стоимость 1 час работы соответственно локомотивной бригады и бригады проводников, тг;

$C_{\text{пасс-ч}}$ — стоимость 1 пас-час, тг;

m — число вагонов в составе поезда;

$\alpha_l, \beta_l, \beta_n$ — коэффициенты, учитывающие время вне поездной работы, соответственно локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников.

Нормативы стоимости, тыс. тг.

Стоимость 1 вагоно-час для вагонов:

Мягкого.....1,803

Купейного.....1,623

Плацкартного.....1,042

Вагона-ресторана.....0,860

Багажного.....0,851

Почтового.....0,851

Стоимость 1 час работы локомотивной бригады:

для электрической.....3,19

для тепловозной тяги.....2,98

Стоимость 1 бригадо-ч проводников.....0,54

Стоимость 1 пассажира-ч.....0,10 — 0,15

Наивыгоднейшее значение ходовой скорости движения при заданном весе и расчетной населенности определяется минимальным значением функции (тг), которое может быть найдено графически для каждой композиции состава (Рис. 1). Оптимальный вес — минимальными приведенными затратами, приходящимися на одного пассажира.

$$F = \left\{ (P + Q)(\omega_0 + i_3) 10^{-3} L + 3,8(P + Q)(\alpha v_x)^2 10^{-6} K_{ост} \right\} C_{м-км} + \frac{L}{\beta_m v_x} C_{п-ч}, \quad (4)$$

Полученные вес и скорость проверяют по ряду требований.

1 Соответствие мощности заданного локомотива по условию трогания с места

$$Q = \frac{F_{mp}}{\omega_{mp} + i_p} - P, \quad (5)$$

где: F_{mp} — сила тяги локомотива при трогании с места;

ω_{mp} — удельное сопротивление состава при трогании с места;

i_p — расчетный подъем.

Если вес поезда, полученный по формуле (5), больше определенного технико-экономическими расчетами, то заданный локомотив обеспечивает трогание с места пассажирского поезда на расчетном подъеме.

2 Соответствие мощности локомотива оптимальной ходовой скорости проверяют исходя из технико-экономических расчетов. Поезд должен иметь скорость на расчетном подъеме v_p не ниже, чем определенную соотношением $v_p = v_x / \kappa$, где значения κ принимаются в зависимости от типа профиля и серии локомотива.

$$N = \frac{F v_p}{367,2}.$$

Мощность локомотива (кВт)

Принимая во внимание, что $F = P(\omega'_0 + i_p) + Q(\omega''_0 + i_p)$, имеем

$$[P(\omega'_0 + i_p) + Q(\omega''_0 + i_p)] v_p = 367,2 N \quad (5)$$

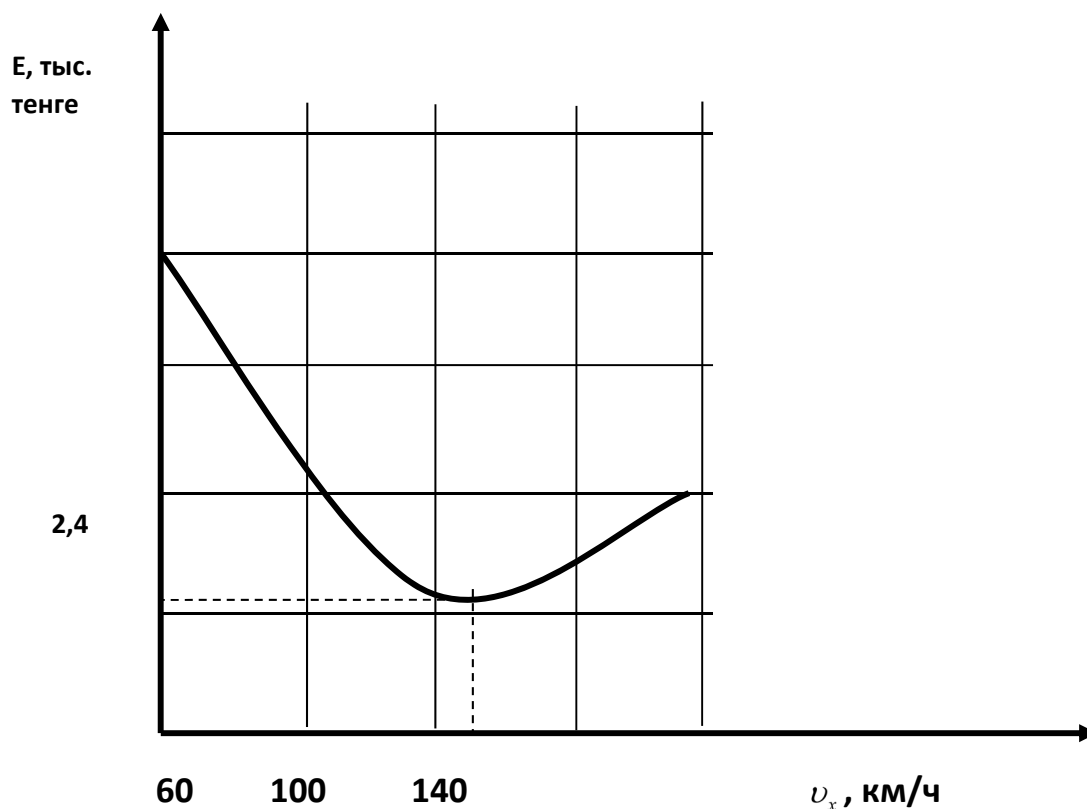


Рис. 1. Графическое определение оптимальной ходовой скорости движения пассажирского поезда при заданном весе (композиция)

В данном уравнении неизвестна скорость на расчетном подъеме, которая может быть найдена графоаналитическим способом, приведенным на Рисунке 2, горизонтальная прямая соответствует наличной мощности локомотива, (правая часть уравнения (5)); кривая — потребной мощности локомотива для реализации различных значений скорости на расчетном подъеме (левая часть уравнения (5)).

Если значение скорости на расчетном подъеме, определенное по условию v_x / κ , больше, чем полученное графоаналитическим способом, то заданный локомотив не может реализовать оптимальную ходовую скорость. Для дальнейших расчетов ходовая скорость принимается в соответствии с мощностью локомотива или другими ограничениями.

3 Согласно Инструкции по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР длина поезда должна соответствовать длине пассажирских платформ на станциях рассматриваемого направления.

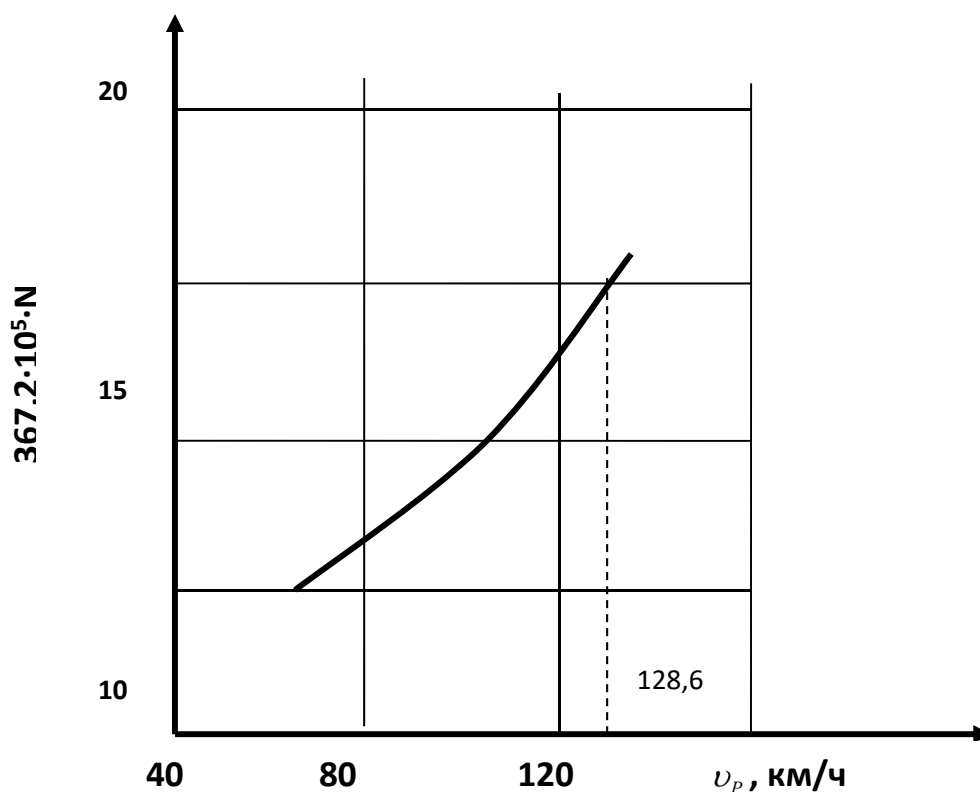


Рис. 2. Графоаналитическое определение скорости на расчетном подъеме

Для определения оптимальной скорости пассажирского поезда с локомотивом ЧС2 весом 120 т в условиях текущей эксплуатации железных дорог без выполнения реконструктивных мероприятий необходимы основные характеристики вагонов в составе поезда, приведенные в таблице 1, соответствуют справочнику (Колпаков, 1983: 114–239).

Для условий примера $C_{л-ч} = 3,54$ тыс. тг.; $C_{б-ч}^л = 3,19$ тыс. тг.; $C_{б-ч}^{np} = 0,54$ тыс. тг.; $C_{пасс-ч} = 0,10$ тыс. тг.; $L = 1000$ км; $K_{ост} = 50$; $C'_{т-км} = 0,063$ тыс. тг. Коэффициенты, учитывающие внепоездное время работы локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников, соответственно равны $\alpha_l = 1,2$; $\beta_l = 1,2$; $\beta_n = 1,1$.

Результаты расчета временной и энергетической слагающих по формуле (4) приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Основные характеристики вагонов в составе поезда

Категория вагона	Число вагонов	Тара вагона, т	Нагрузка от пассажиров и ручной клади в вагоне, т	Суммарный вес вагонов, т	Населенность вагона, чел.	Суммарная населенность, чел.
Мягкий	1	59	3	62	32	32
Купейный	6	52	4	336	38	228
Некупейный	8	51	6	456	76	608
Багажный	1	45	12	57	-	-
Вагон-ресторан	1	56	3	59	-	-
итого	17	-	-	970	-	868

Таблица 2 - Результаты расчета временной и энергетической слагающих

Скорость, км/ч	60	100	140	180	220
Затраты, тыс. тг:					
энергетические	287	466	717	1042	1440
временные	2637	1582	1130	879	719
суммарные	2924	2048	1847	1921	2159

Оптимальное значение скорости движения равно 150 км/ч (Рис. 1).

Пассажиropoтoкu на направлении могут быть освоены различными способами, отличающимися числом, весом, скоростью движения поездов, мощностью тяговых средств, а, следовательно, временем, затрачиваемым пассажирами, и транспортными расходами. При определении оптимальных значений перечисленных параметров необходимо исходить из общего единого критерия оптимальности. Таким критерием являются приведенные сопоставимые народнохозяйственные затраты, включающие транспортные расходы и стоимость пассажиpo-часов.

Расчет каждого варианта — сложная и трудоемкая задача. Сложность заключается в том, что для решения необходимы такие исходные данные, как ходовая скорость и затрата работы на тягу поездов. Определить их можно, установив взаимосвязь между весом и скоростью поезда, а характер этой зависимости определяется в значительной степени профильными условиями участка.

В грузовом движении комплексным показателем, определяющим в сочетании с характеристикой профиля пути тягово-энергетические показатели движения поезда, является удельная мощность тяги, под которой понимается мощность в киловаттах, приходящаяся на 1 т веса поезда. Для экспериментальной проверки этого положения в пассажирском движении, установления характера и количественных параметров зависимости были выполнены тяговые расчеты способом по характеристикам профиля пути, то позволили учесть влияние инерции поезда и отдельных элементов профиля на тягово-энергетические показатели движения поездов. Тяговые расчеты выполнены для 6 поезде-участков общей протяженностью более 750 км с электрической и тепловозной тягой. Зависимость основного удельного сопротивления от скорости выражена формулой ВНИИЖТ: при нагрузке от оси вагона на рельсы в 12,5 т расчетный тормозной коэффициент принят для композиционных колодок 0,29. Тяговые расчеты выполнены для электропоездов и тепловозов, двух режимов ведения поезда (с остановками и без остановок), четырех вариантов веса поезда (400, 600, 800, 1000 т). Хотя тягово-энергетические показатели движения определяются особенностями ведущего локомотива (типом двигателя, системой возбуждения тяговых двигателей и др.), с достаточной для сравнения вариантов точностью они могут быть определенным образом сгруппированы по видам тяги и типам профиля пути.

Обработка полученных данных позволила установить зависимости ходовой скорости, работы локомотива, потерь времени и энергии, возникающих при остановках, от удельной мощности локомотива на каждом типе профиля пути (Рис. 3-6), что значительно упростило трудоемкие вариантные тяговые расчеты для различных серий локомотивов и весов поездов. Удельная мощность локомотива влияет на ряд показателей, связанных с изменением веса и скорости, к числу которых относятся время нахождения пассажиров в пути; время использования технических средств транспорта для перевозки; время работы штата, обслуживающего поезд; количество работы локомотива, затрачиваемой на тягу; потери механической работы локомотива и времени, возникающие при остановках.

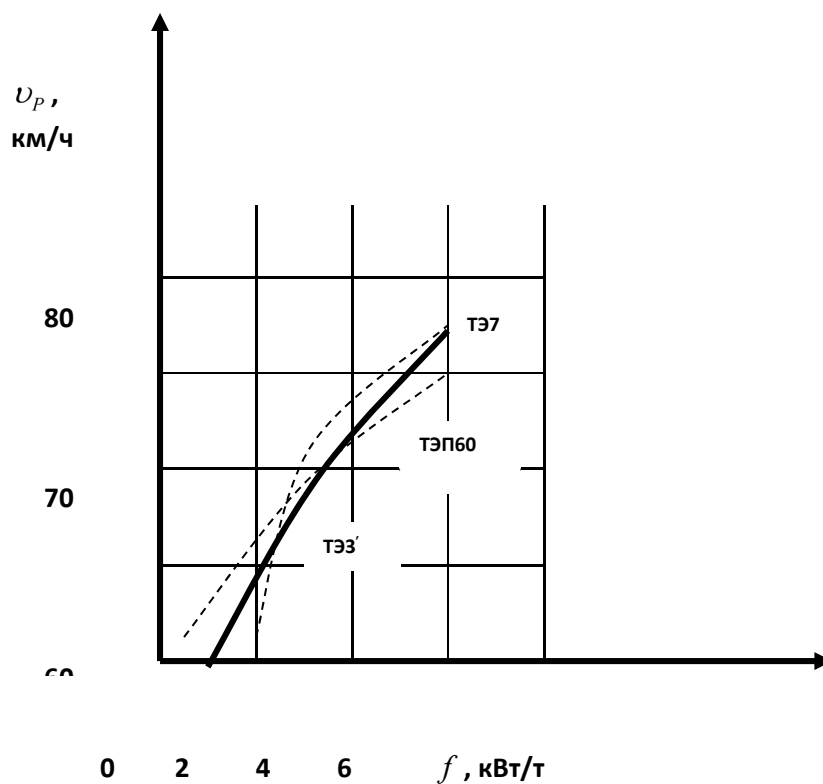


Рис. 3. Зависимость технической скорости от удельной мощности тепловоза (IV тип профиля пути)

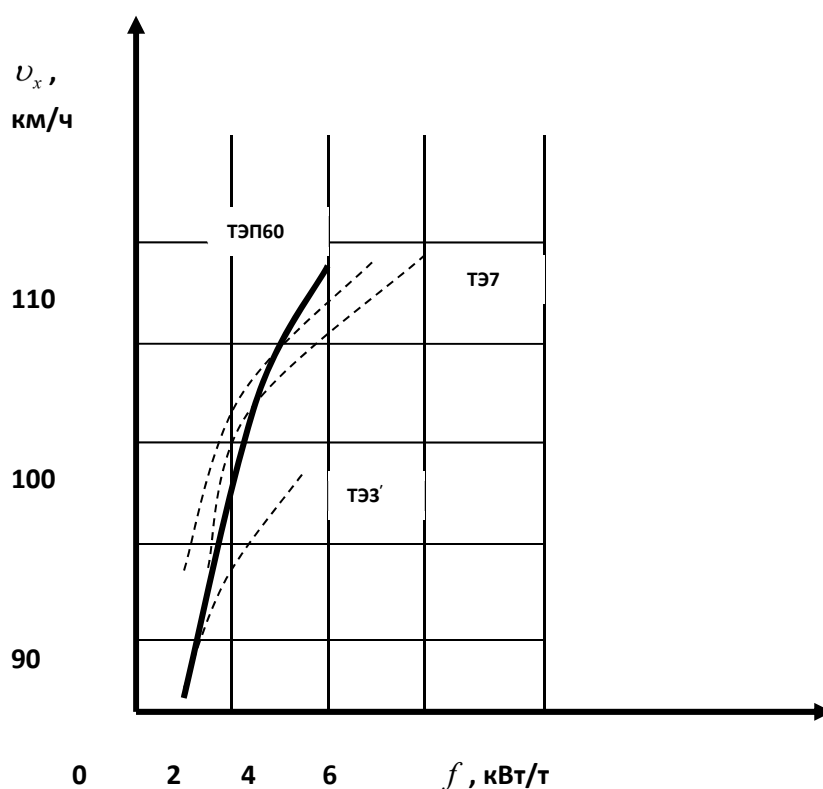


Рис. 4. Зависимость ходовой скорости от удельной мощности тепловоза (III тип профиля пути)

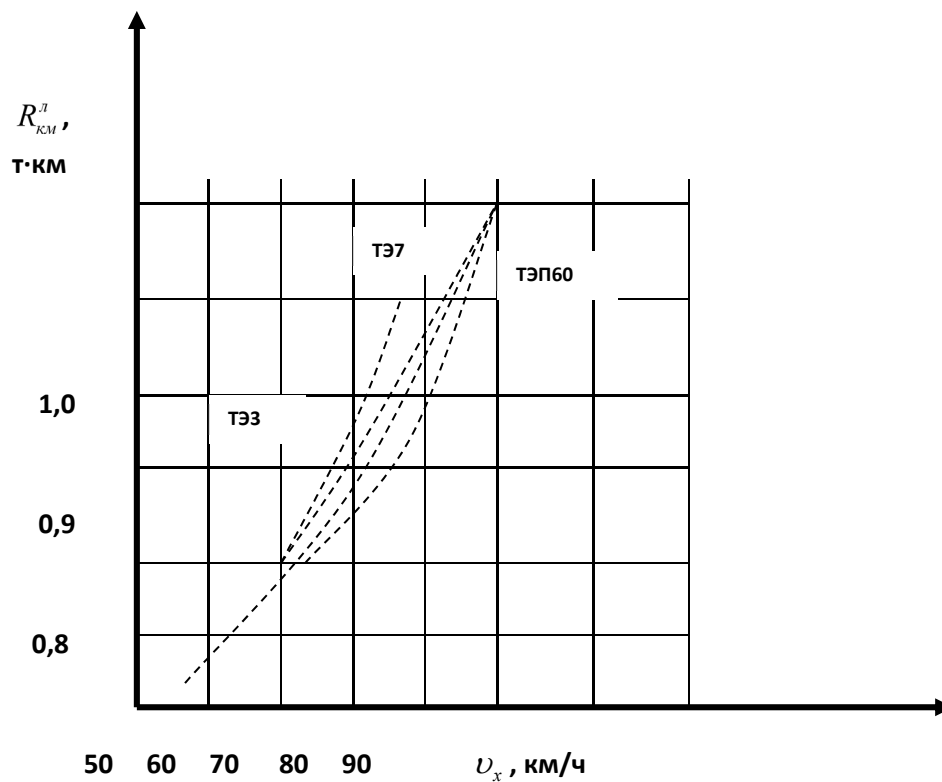


Рис. 5. Зависимость работы тепловоза от ходовой скорости (IV тип профиля пути)

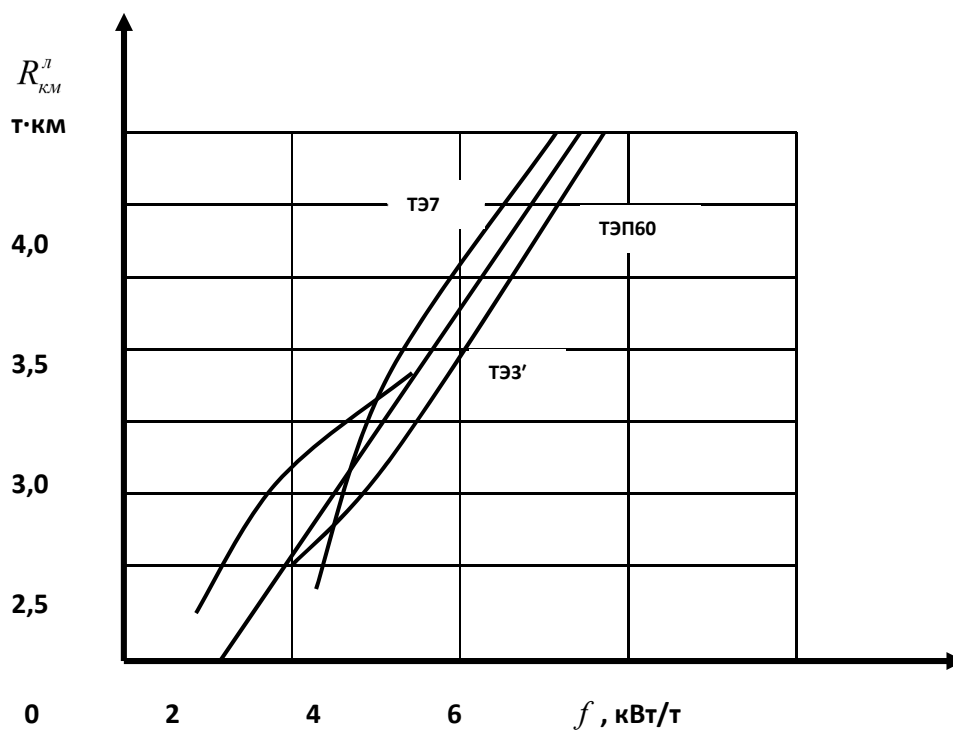


Рис. 6. Зависимость работы тепловоза, затрачиваемой на остановку, от его удельной мощности (II тип профиля пути)

Для того чтобы установить зависимость приведенных затрат от удельной мощности, рассмотрим их величину на измеритель 1000 пассажиро-км:

$$e = 10^{-3} \left\{ \frac{C_{\text{пасс-ч}}}{\beta_m v_x} + \frac{1}{q_m \gamma} \left(\frac{1}{\beta_m v_x} + t_{\text{осн}} + t_{\text{об}} \right) C_{\text{в-ч}} + \frac{1}{m v_m \gamma q_m} (\alpha_l C_{\text{л-ч}} + \beta_l C_{\text{б-ч}}^{\text{л}} + \beta_n C_{\text{б-ч}}^{\text{н}}) \right\} +$$

$$+ \frac{C_{\text{б-ч}}^{\text{н}}}{\beta_m v_x \gamma q_m} + \frac{R_{100}^{\text{км}} C_{\text{т-км}}}{\gamma 100} + \frac{r C_{\text{т-км}}}{\gamma_{\text{ср}}} \quad (6)$$

где: $C_{\text{пасс-ч}}$ — стоимость 1 пас-ч, тг;
 γ — число мест, приходящееся на 1 т тары вагона;
 $t_{\text{осн}}; t_{\text{об}}$ — время простоя состава в пунктах прицепки и оборота в соответствии с расписанием движения, час;

$\alpha_l, \beta_l, \beta_n$ — коэффициенты, учитывающие внепоездное время работы локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников;

m — число вагонов в составе;

v_m — маршрутная скорость, км/ч ($v_m = \beta_m v_x$);

q_m — тара вагона, т;

$C_{\text{в-ч}}$ — стоимость 1 вагоно-ч, тг;

$C_{\text{б-ч}}^{\text{л}}, C_{\text{б-ч}}^{\text{н}}$ — стоимость работы соответственно локомотивной бригады и бригады проводников, тг;

$C_{\text{л-ч}}$ — стоимость 1 локомотиво-ч, тг;

$R_{100}^{\text{км}}$ — затрата работы локомотива на 1 км пути на каждые 100 т веса поезда (с учетом нагрузки от пассажиров и ручной клади);

$C_{\text{т-км}}$ — стоимость 1 т-км работы локомотива, тг;

$l_{\text{ср}}$ — среднее расстояние между остановками поездов на станциях, км;

γ — потери работы локомотива при остановке, ткм/т.

В приведенной формуле ходовая скорость и затраты работы зависят от одного показателя — удельной мощности локомотива. Однако аналитические зависимости ходовой скорости и работы от удельной мощности достаточно сложны, поэтому затраты определены при различных значениях удельной мощности и полученные расчетные точки аппроксимированы выражением

$$e = af^2 - bf + c,$$

где a, b, c — коэффициенты, зависящие от мощности тяговых средств и типа профиля пути (таблица 3).

Таблица 3 - Коэффициенты, зависящие от мощности тяговых средств и типа профиля пути

Тип профиля пути	Коэффициенты и степень точности	Номинальная мощность, кВт				
		2000	3000	4000	5000	6000
I	a	0,01522	0,01472	0,01694	0,01624	0,01628
	b	0,07947	0,08329	0,09499	0,09313	0,09619
	c	2,80109	2,79640	2,80824	2,80136	2,80602

	%	0,5021	0,5157	0,4801	0,5043	0,4426
II	a	0,01776	0,01681	0,01904	0,01874	0,01875
	b	0,09794	0,10314	0,11589	0,11620	0,12104
	c	3,11495	3,10991	3,12128	3,11924	3,12596
	%	0,6530	0,6895	0,6462	0,6467	0,9282
III	a	0,02231	0,02188	0,02389	0,02364	0,02339
	b	0,15753	0,16216	0,17281	0,17391	0,17401
	c	3,23536	3,23227	3,24202	3,24202	3,23769
	%	0,5779	0,5265	0,5253	0,5334	0,5308
IV	a	0,00578	0,00539	0,00737	0,00716	0,00709
	b	0,00853	0,00321	0,00719	0,00885	0,01023
	c	2,53833	2,53657	2,54616	2,54528	2,54560
	%	0,2937	0,2701	0,2975	0,2853	0,3108

Установленная зависимость затрат от удельной мощности локомотива дает возможность аналитически решить ряд задач рационального освоения пассажиропотока, а именно определить:

- оптимальную удельную мощность локомотива на каждом типе, профиля пути, а, следовательно, и наивыгоднейшую ходовую скорость движения;
- целесообразную мощность локомотива при заданном варианте плана формирования;
- размеры движения и пункты обращения поездов.

В общем виде затраты, связанные с освоением расчетных пассажиропотоков на направлении с п-опорными станциями (участки с различными профильными условиями), составляют

$$E = \gamma 10^{-3} \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=\phi}^{\xi} x_j \left(f_j^2 \sum_{i=R}^{\omega-j} \alpha_i L_i - f_j \sum_{i=k}^{\omega-j} b_i L_i + \sum_{i=k}^{\omega-j} C_i L_i \right) \left(\frac{N}{f_j} - P \right), \quad (7)$$

где: N — мощность локомотива, кВт;

P — вес локомотива, т;

f_j — удельная мощность локомотива;

L_i — длина i -го участка, км;

x_j — число поездов сообщения j .

$$\left. \begin{aligned} \xi &= nk - \frac{1}{2}(k^2 + k) \\ \phi &= (2n - k) \frac{k-1}{2} + 1 \\ \omega &= nk - \frac{1}{2}(k^2 - k) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система ограничений, обеспечивающая соответствие общего пассажиропотока, следующего по участку, числу предложенных мест для участка k , имеет вид

$$\sum_{j=\psi}^{\xi} \gamma \left(\frac{N}{f_j} - P \right) x_j = \sum_{j=\psi}^{\xi} A_j, \quad (9)$$

где: A_j — расчетный пассажиропоток сообщения j .

Чтобы определить оптимальные значения переменных $x_1, x_2, \dots, x_j, f_1, f_2, \dots, f_j$, необходимо найти минимум затрат при заданных ограничениях, т. е. решить задачу на условный экстремум функции многих переменных. Воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Составим вспомогательную функцию

$$F = E + \lambda_k \left[\sum_{j=\psi}^{\xi} \gamma \left(\frac{N}{f_j} - P \right) x_j - \sum_{j=\psi}^{\xi} A_j \right], \quad (10)$$

(λ_k — множитель Лагранжа). Найдем j частных производных по f_j и по x_j от функции F и приравняем их нулю. Эти уравнения совместно с $(n - 1)$ уравнениями ограничений образуют систему, из которой можно определить значения искомых переменных. Применение этого метода рассмотрим на направлении с четырьмя опорными станциями. Введем новую переменную

$$\gamma_j \left(\frac{N}{f_j} - P \right) = u_j. \quad (11)$$

В этом случае выражение затрат принимает вид

$$\begin{aligned} E_4 = 10^{-3} & \left[u_1 \left(f_1^2 \sum_1^3 a_i L_i - f_1 \sum_1^3 b_i L_i + \sum_1^3 c_i L_i \right) + u_2 \left(f_2^2 \sum_1^2 a_i L_i - f_2 \sum_1^2 b_i L_i + \sum_1^2 c_i L_i \right) + \right. \\ & + u_3 \left(f_3^2 a_1 L_1 - f_3 b_1 L_1 + c_1 L_1 \right) + u_4 \left(f_4^2 \sum_2^3 a_i L_i - f_i \sum_2^3 b_i L_i + \sum_2^3 c_i L_i \right) + \\ & \left. + u_5 \left(f_5^2 a_2 L_2 - f_5 b_2 L_2 + c_2 L_2 \right) + u_6 \left(f_6^2 a_3 L_3 - f_6 b_3 L_3 + c_3 L_3 \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned}
 &U_1 + U_2 + U_3 - A_{1-4} - A_{1-3} - A_{1-2} = 0; \\
 &U_4 + U_5 + U_2 + U_1 - A_{1-4} - A_{1-3} - A_{2-4} - A_{2-3} = 0; \\
 &U_1 + U_4 + U_6 - A_{1-4} - A_{2-4} - A_{3-4} = 0; \\
 &\frac{dF}{df_1} = \left(2f_1 \sum_1^3 a_i L_i - \sum_1^3 b_i L_i \right) u_1 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_2} = \left(2f_2 \sum_1^2 a_i L_i - \sum_1^2 b_i L_i \right) u_2 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_3} = (2f_3 a_1 L_1 - b_1 L_1) U_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_4} = \left(2f_4 \sum_2^3 a_i L_i - \sum_2^3 b_i L_i \right) U_4 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_5} = (2f_5 a_2 L_2 - b_2 L_2) U_5 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_6} = (2f_6 a_3 L_3 - b_3 L_3) U_6 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_1} = \left(f_1^2 \sum_1^3 a_i L_i - f_1 \sum_1^3 b_i L_i + \sum_1^3 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_2} = \left(f_2^2 \sum_1^2 a_i L_i - f_2 \sum_1^2 b_i L_i + \sum_1^2 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_3} = (f_3^2 a_1 L_1 - f_3 b_1 L_1 + c_1 L_1) 10^{-3} + \lambda_1 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_4} = \left(f_4^2 \sum_2^3 a_i L_i - f_4 \sum_2^3 b_i L_i + \sum_2^3 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_5} = (f_5^2 a_2 L_2 - f_5 b_2 L_2 + c_2 L_2) 10^{-3} + \lambda_2 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_6} = (f_6^2 a_3 L_3 - f_6 b_3 L_3 + c_3 L_3) 10^{-3} + \lambda_3 = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Полагая, например, что значения u_1, u_2, u_3 отличны от нуля, найдем, что

$$f_1 = \frac{\sum_1^3 b_i L_i}{2 \sum_1^3 a_i L_i}; f_2 = \frac{\sum_1^2 b_i L_i}{2 \sum_1^2 a_i L_i}; f_3 = \frac{b_1 L_1}{2 a_1 L_1}, \quad (14)$$

а, следовательно,

$$\lambda_1 = \left[\frac{b_1 L_1}{4 a_1 L_1} - c_1 L_1 \right] 10^{-3};$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 &= \left[\frac{\left(\sum_1^2 b_i L_i \right)^2}{4 \sum_1^2 a_i L_i} - \frac{b_1 L_1}{4 a_1 L_1} - c_2 L_2 \right] 10^{-3} \\ \lambda_3 &= \left[\frac{\left(\sum_1^3 b_i L_i \right)^2}{4 \sum_1^3 a_i L_i} - \frac{\sum_1^2 b_i L_i}{4 \sum_1^2 a_i L_i} - c_3 L_3 \right] 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Подставляя $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в последние три уравнения системы (8), определим f_4, f_5, f_6 , отличные от значений, при которых выражение в скобках последних трех производных по f_j равно нулю. Следовательно, нулю равны значения u_4, u_5, u_6 . В общем случае решением системы являются $n - 1$ переменных x_j , отличных от нуля, а соответствующие им удельные мощности

$$f_j = \frac{\sum_{i=k}^{\omega-j} b_i L_i}{2 \sum_{i=k}^{\omega-j} a_i L_i} \quad (16)$$

Численные значения x_j находятся из системы ограничений. Расчеты всех возможных сочетаний позволяют определить стационарные точки, выбрать тот вариант, при котором функция затрат имеет наименьшее значение. Однако, определяя набор переменных x_j следует иметь в виду, что все значения должны быть положительными.

Если на направлении, включающем три участка, расчетные пассажиропотоки с первой станции соответственно на четвертую, третью, вторую равны $A_1 = 562; A_2 = 1025; A_3 = 1030$; со второй на четвертую и третью $A_4 = 105; A_5 = 460$; с третьей на четвертую $A_6 = 30; N = 4000m$. Первый участок длиной 200 км относится к I типу профиля пути по классификации (Азар, 1973: 56–100), второй протяжением 200 км — ко II, третий длиной 100 км — к III. Требуется определить размеры движения и пункты обращения поездов, которые обеспечат освоение расчетных пассажиропотоков с минимумом затрат. Находим значения коэффициентов:

$$a_1 = 0,01694; b_1 = 0,09499; c_1 = 2,80824;$$

$$a_2 = 0,01904; b_2 = 0,11589; c_2 = 3,12128;$$

$$a_3 = 0,02389; b_3 = 0,17281; c_3 = 3,24202.$$

Определим значения удельных мощностей для каждого поезда по формуле (1):

$$f_1 = 3,11; f_2 = 2,93; f_3 = 2,79; f_4 = 3,27; f_5 = 3,03; f_6 = 3,62.$$

Рассматривая возможные варианты сочетаний отличных от нуля значений x_j , число которых в данном примере равно 10, подставляем их в систему ограничений. Решением системы являются только два набора положительных значений: первый при

$x_1 = 0,434; x_2 = 0,848; x_3 = 0,290$ определяет наличие поездов с первой станции соответственно на четвертую, третью, вторую; второй при $x_1 = 0,434; x_3 = 1,094; x_5 = 0,880$ выражает потребность в поездах соответственно с первой на четвертую, с первой на вторую и со второй на третью. Однако второй набор не удовлетворяет условиям обеспечения беспересадочного сообщения в пределах направления и, следовательно, должен быть исключен из рассмотрения. Оптимальным в данном случае является вариант $x_1 = 0,434; x_2 = 0,848; x_3 = 0,290$.

Дробные значения неизвестных показывают, что при данном типе локомотива поезда целесообразно отправлять не ежедневно, а в соответствии с колебанием пассажиропотока по дням. Полученные размеры движения установлены исходя из минимума затрат, включающих транспортные расходы, а также расходы, связанные со временем нахождения пассажиров в пути следования.

Из приведенного расчета следует вывод о том, что поезда, вводимые в обращение, должны быть оптимальной удельной мощности, учитывающей особенности участков, и число поездов определяется при заданном значении удельной мощности для каждого назначения.

Заключение

В настоящей работе была поставлена цель – исследовать и определить оптимальные параметры формирования и движения пассажирских поездов с целью повышения экономической эффективности перевозок и улучшения качества обслуживания пассажиров. Для достижения данной цели была разработана методологическая база исследования, включающая: сбор и анализ исходных данных о пассажирских составах, локомотивах и железнодорожной инфраструктуре; формирование вариантов состава поезда; проведение технико-экономических расчетов; применение графоаналитического метода и математического моделирования; а также проведение сравнительного анализа полученных результатов с нормативными требованиями и техническими ограничениями.

Использование комплексного подхода позволило всесторонне изучить влияние различных факторов на эффективность движения пассажирских поездов. Применение методов графоаналитического моделирования и математического анализа позволило выявить оптимальные соотношения количества и типов вагонов, веса состава и скорости движения. Проведенные расчеты показали, что выбор оптимальной композиции состава позволяет снизить затраты на тягу локомотива, уменьшить эксплуатационные расходы на вагоны и персонал, а также повысить комфорт пассажиров за счет рационального распределения категорий вагонов по составу.

Полученные результаты подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что оптимизация состава и режима движения пассажирских поездов возможна при системном анализе технико-экономических показателей и математическом моделировании с учетом действующих ограничений. В частности, выявлено, что для поездов протяженностью до 800 км оптимальный состав включает определенное соотношение мягких, купейных и плацкартных вагонов, что обеспечивает максимальную заполняемость при минимальных эксплуатационных затратах. Анализ зависимости затрат от массы состава и скорости движения показал наличие критических точек, при которых дальнейшее увеличение числа вагонов или скорости движения приводит к существенному росту расходов и снижению экономической эффективности.

В ходе исследования было выявлено несколько новых закономерностей, ранее не отраженных в существующих публикациях. Во-первых, оптимальная скорость движения поезда напрямую зависит от профиля пути и мощности локомотива, а не только от числа вагонов. Во-вторых, распределение вагонов по категориям существенно влияет на среднюю скорость движения и энергозатраты на участке, особенно при наличии промежуточных остановок. Эти результаты позволяют уточнить существующие рекомендации по

формированию составов пассажирских поездов и внесли вклад в развитие научного знания в области железнодорожного транспорта.

Практическое значение работы заключается в возможности использования полученных результатов для планирования пассажирских перевозок, повышения экономической эффективности эксплуатации железнодорожного подвижного состава и улучшения качества обслуживания пассажиров. Предложенные методы и подходы могут быть внедрены при проектировании новых поездов, обновлении локомотивного парка, а также при планировании расписаний с учетом пассажиропотоков на различных направлениях. Использование оптимизированного состава и режима движения позволит снизить эксплуатационные расходы, увеличить пропускную способность железнодорожных линий и сократить время перевозки пассажиров.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение модели оптимизации с учетом сезонных колебаний пассажиропотока, внедрение методов прогнозирования спроса и интеграцию систем автоматического управления движением поездов. Также возможна адаптация разработанных подходов для высокоскоростных пассажирских поездов и смешанных перевозок пассажиров и грузов, что позволит комплексно повысить эффективность работы железнодорожного транспорта.

Таким образом, проведенное исследование позволило подтвердить истинность выдвинутого автором тезиса о возможности оптимизации состава и движения пассажирских поездов с использованием системного анализа и математического моделирования. Полученные результаты вносят новый вклад в развитие научного знания в области транспортного строительства и эксплуатации железнодорожного подвижного состава и создают основу для практического внедрения оптимизированных решений в сфере пассажирских перевозок.

ЛИТЕРАТУРА

- Правдин, 1990 — Правдин Н.В., Рябуха Л.С., Лукашев В.И. Технология работы вокзалов и пассажирских станций. — М.: Транспорт. — 1990. — С. 319–320. [Russ.]
- Колпаков, 1983 — Колпаков В.С., Шубко В.Г. Совершенствование пассажирских перевозок. — М.: Транспорт. — 1983. — 456 с. [Russ.]
- Азар, 1973 — Азар В.И., Поляк С.В. Транспорт и туризм. — М.: Транспорт. — 1973. — 159 с. [Russ.]
- Дмитренко, 2006 — Дмитренко А.В., Терзи В.И., Кузьмин А.В., Жуковский Ю.Н., Раннев А.И. Эффективные пути повышения населенности составов пригородных электропоездов перевозочным процессом в транспортных системах // Промышленный транспорт Казахстана. — Алматы. — 2006. — № 1 (7). — С. 34–38. [Russ.]
- Вахитова, 2006а — Вахитова Л.В., Телюк Н.В. Математическая модель определения оптимальных вариантов плана формирования пассажирских поездов на основе экономических факторов // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт Евразии: взгляд в XXI век». — Т. 1. — Алматы. — 2006. — С. 96–98. [Russ.]
- Вахитова, 2006б — Вахитова Л.В. Исследование процесса организации пассажирских перевозок с применением методов прогнозирования // Поиск. — 2006. — № 2. — С. 294–298. [Russ.]
- Кобдилов, 2007 — Кобдилов М.А., Вахитова Л.В. Экономическое обоснование выбора оптимального формирования пассажирских поездов на железнодорожном полигоне с учетом резерва пропускной способности // Поиск. — 2007. — № 4. — С. 263–266. [Russ.]
- Касымов, 2006 — Касымов Е.К., Вахитова Л.В. Определение оптимального количества пассажирских поездов по видам сообщения // Вестник КазАТК. — 2006. — № 1. — С. 49–52. [Russ.]
- Тихомиров, 1979 — Организация движения на железнодорожном транспорте / под ред. И.Г. Тихомирова. — Минск: Высшая школа, 1979. — 349 с. [Russ.]
- Мустапаева, 2006 — Мустапаева А.Д., Вахитова Л.В. Пути совершенствования пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте Республики Казахстан // Вестник КазАТК. — 2006. — № 2. — С. 75–81. [Russ.]

REFERENCES

- Pravdin 1990 — Pravdin, N.V., Ryabukha, L.S., Lukashev, V.I. (1990). Tekhnologiya raboty vokzalov i passazhirskikh stantsii [Technology of operation of railway stations and passenger terminals]. — Moscow: Transport. — 1990. — Pp. 319–320. [in Russ.]
- Kolpakov 1983 — Kolpakov, V.S., Shubko, V.G. (1983). Sovershenstvovanie passazhirskikh perevozok [Improvement of passenger transportation]. — Moscow: Transport. — 1983. — 456 p. [in Russ.]
- Azar 1973 — Azar, V.I., Polyak, S.V. (1973). Transport i turizm [Transport and tourism]. — Moscow: Transport. — 1973. — 159 p. [in Russ.]
- Dmitrenko 2006 — Dmitrenko, A.V., Terzi, V.I., Kuzmin, A.V., Zhukovskii, Yu.N., Rannev, A.I. (2006). Effektivnye puti povysheniya naselennosti sostavov prigorodnykh elektropoezdov perevozochnym protsessom v transportnykh

sistemakh [Effective ways to increase occupancy of suburban electric train consists within the transportation process in transport systems]. // *Promyshlennyi transport Kazakhstana*. — Almaty. — 2006. — No. 1 (7). — Pp. 34–38. [in Russ.]

Vakhitova 2006a — Vakhitova, L.V., Telyuk, N.V. (2006). Matematicheskaya model opredeleniya optimalnykh variantov plana formirovaniya passazhirskikh poezdov na osnove ekonomicheskikh faktorov [Mathematical model for determining optimal variants of passenger train formation plans based on economic factors]. // *Proc. of the IV Int. Sci.-Pract. Conf. "Transport Evrazii: vzglyad v XXI vek"*. — Vol. 1. — Almaty. — 2006. — Pp. 96–98. [in Russ.]

Vakhitova 2006b — Vakhitova, L.V. (2006). Issledovanie protsessa organizatsii passazhirskikh perevozok s primeneniem metodov prognozirovaniya [Study of the process of organizing passenger transportation using forecasting methods]. // *Poisk*. — 2006. — No. 2. — Pp. 294–298. [in Russ.]

Kobdikov 2007 — Kobdikov, M.A., Vakhitova, L.V. (2007). Ekonomicheskoe obosnovanie vybora optimalnogo formirovaniya passazhirskikh poezdov na zheleznodorozhnom poligone s uchetom rezerva propusknoi sposobnosti [Economic justification for selecting optimal passenger train formation on a railway network considering capacity reserves]. // *Poisk*. — 2007. — No. 4. — Pp. 263–266. [in Russ.]

Kasymov 2006 — Kasymov, E.K., Vakhitova, L.V. (2006). Opredelenie optimalnogo kolichestva passazhirskikh poezdov po vidam soobshcheniya [Determination of the optimal number of passenger trains by types of service]. // *Vestnik KazATK*. — 2006. — No. 1. — Pp. 49–52. [in Russ.]

Tikhomirov 1979 — Tikhomirov, I.G. (Ed.). (1979). Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Organization of railway traffic]. — Minsk: Vysshaya shkola. — 1979. — 349 p. [in Russ.]

Mustapaeva 2006 — Mustapaeva, A.D., Vakhitova, L.V. (2006). Puti sovershenstvovaniya passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte Respubliki Kazakhstan [Ways to improve passenger transportation on the railway transport of the Republic of Kazakhstan]. // *Vestnik KazATK*. — 2006. — No. 2. — Pp. 75–81. [in Russ.]