



# Оптимизация скорости движения поездов



*Дмитрий Юрьевич Левин*  
АО «НИИАС», Москва, Россия.  
✉ [levindu@yandex.ru](mailto:levindu@yandex.ru)

Дмитрий ЛЕВИН

## АННОТАЦИЯ

Рассматривается значение скорости движения поездов в деятельности железнодорожного транспорта, представлена широкая панорама влияния, с одной стороны, скорости на перевозочный процесс грузов и пассажиров, с другой стороны, – подвижного состава, инфраструктуры и организации перевозок на скорость.

Целью статьи является расширение представления о скорости на железнодорожном транспорте с помощью анализа отечественной и зарубежной истории развития и полученных результатов исследования скорости движения поездов.

Несмотря на, казалось бы, всю определённую скорость движения, история её развития свидетельствует о

большом диапазоне мнений и неочевидности оценок. Исторический обзор содержит мнения о развитии проблемы и взаимодействии скорости с другими показателями.

Взаимодействие скорости движения поездов со всеми составляющими перевозочного процесса описывается различными зависимостями. Поэтому экономическая эффективность от повышения скорости движения поездов может быть получена только при системном подходе.

Анализ современных исследований показывает возможности повышения скорости. Результаты исследований автора раскрывают глубинные возможности и целесообразность повышения скорости движения поездов.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, скорость, взаимодействие скорости с другими показателями, нормирование, вес поездов, системный подход, интенсивность и плотность потока поездов, распределение скоростей.

**Для цитирования:** Левин Д. Ю. Оптимизация скорости движения поездов // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 73–90. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-6-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.



## ВВЕДЕНИЕ

Скорость с незапамятных времён волновала человечество. Это направление научно-технического прогресса позволило освоить поверхность планеты, околоземное пространство, а в будущем поможет перемещаться за пределами Солнечной системы. И, тем не менее, пока не поставлена точка в изучении вопросов скорости движения на железнодорожном транспорте. Известны факторы, влияющие на скорость движения поездов, и факторы влияния скорости на вес поездов, расход топлива и пропускную способность. Но нет пока целостной картины скорости перевозочного процесса.

Скорость движения поездов связывают со сроками доставки грузов [1]. Но в перевозочном процессе перемещение грузов в поездах составляет менее трети времени доставки. Остальное время доставки грузы находятся на станциях для выполнения грузовых, технических и технологических операций. А нахождение грузов на станциях и грузовых фронтах не связывают со скоростью и называют «временем нахождения» и «выполнением операций». В результате на части пути перевозки грузов идёт борьба за ускорение, измеряемое в минутах, а на других участках этого пути – простои, измеряемые в часах.

Скорость движения поездов – это максимально допустимая, расчётная, ходовая, техническая, участковая, маршрутная, а на станциях называется: нахождение и простой. Для движения необходимы инфраструктура, подвижной состав, топливо, а для простоя на станциях ничего не нужно кроме ... «чужих» вагонов.

Скорость, как и все элементы технологии перевозочного процесса, имеет две стороны медали. Одна – это нормативно-технологические документы, регламентирующие скорость, другая – их выполнение. В настоящее время значительно больше внимания уделяется разработке нормативно-технологических документов, чем их исполнению. Как бы подразумевается, что главное – разработать график движения, план формирования поездов и т.д., и они автоматически реализуют свои возможности. Но уровень выполнения графика движения, особенно грузовых поездов, далёк от 100 %. Или, достаточно абсурдно может выглядеть автоматизированная система контроля вы-

полнения плана формирования поездов, которая полностью игнорирует оперативную адаптацию организации вагонопотоков к реальным ситуациям – учёт колебаний: размеров струй вагонопотоков, времени накопления составов, загрузки станций, возможности своевременного обеспечения составов локомотивами и т.д.

Поэтому рассмотрим проблему скорости и со стороны нормирования, и с точки зрения возможностей реализации.

Из всего многообразия показателей эксплуатационной работы наиболее системное влияние на организацию перевозочного процесса имеют вес и скорость движения поездов. Нельзя рассматривать скорость движения в отрыве от веса поездов. А оба эти показателя являются производными от возможностей подвижного состава и инфраструктуры. Постоянно происходят большие изменения в техническом оснащении железнодорожного транспорта, которые можно использовать либо на повышение веса, либо на увеличение скорости движения поездов. Вес и скорость – не константы, а важнейшие параметры регулирования режима работы сети, которые определяют качество транспортной продукции [2].

Увеличение скоростей движения грузовых и пассажирских поездов является важной возможностью наращивания пропускной способности железнодорожных линий, ускорения доставки грузов, сокращения времени поездки пассажиров, повышения эффективности использования локомотивных бригад и локомотивов. При этом системный подход к условиям и организации перевозочного процесса и его показателям требует учитывать, что, во-первых, в условиях ограниченных технических и технологических возможностей сети железных дорог просто повышение устанавливаемых скоростей движения не всегда эффективно. Во-вторых, между скоростью движения и весом поездов обратно пропорциональная зависимость, следовательно, увеличение скорости при неизменном техническом оснащении вызывает снижение веса поездов и увеличение числа поездов на участке. В-третьих, увеличение скоростей движения поездов связано с увеличением расхода топливно-энергетических ресурсов. В-четвёртых, скорость влияет на эффективность использования локомотивных бригад и локо-

мотивов, а также ускорение доставки грузов. В-пятых, повышение скорости вызывает дополнительные расходы на техническое обслуживание объектов инфраструктуры. В-шестых, имеется доля вагонов и грузов, требующих ограничения скорости движения. В-седьмых, более быстрые темпы развития пассажирского комплекса сдерживают и ограничивают скорости грузовых перевозок, составляющих основной доход ОАО «РЖД». В-восьмых, на скорость движения влияют: дефицит пропускной и перерабатывающей способности, временно отставленные грузовые поезда, содержание избытка рабочего парка вагонов и перенасыщение участков поездами. Поэтому изолированное, отдельное от других показателей рассмотрение повышения скоростей движения поездов свидетельствует о несистемном решении вопроса.

Протяжённость главных путей, на которых разрешена скорость движения грузовых поездов 90 км/ч (в соответствии с ПТЭ), составляет порядка 10 % эксплуатационной длины сети железных дорог. Ещё несколько лет назад участков с такой максимальной допустимой скоростью вообще не было.

Повышение только установленной скорости движения грузовых поездов без проведения мероприятий, направленных на наращивание технической, участковой, маршрутной скоростей и скорости доставки грузов, малоэффективно. Реализация же мер по увеличению установленной скорости движения на участках сети, например, с 80 до 90 км/ч, при усилении железнодорожной инфраструктуры, но без учёта тяговых свойств локомотива может и не привести к повышению технической и участковой скоростей движения [3].

Рассматривая направления повышения установленной скорости движения поездов, необходимо системно, в комплексе формировать мероприятия по усилению путевого хозяйства, энергоснабжения с проведением тяговых расчётов для определения возможностей реализации локомотивами установленных скоростей с учётом прохождения расчётных подъёмов с расчётной скоростью при отсутствии перегрева тягового оборудования. Системный подход требует учитывать и возможности повышения участковой и маршрутной скоростей за счёт сокращения простоев на станциях.



Рис. 1. Паровоз типа 1–3–1 серии С первого выпуска.

## ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

### Отечественный опыт повышения скорости движения

В истории развития железных дорог России прослеживается последовательное увеличение скоростей. В начале XX века было создано несколько паровозов, которые обслуживали скорые и курьерские поезда. Ещё в 1901 году на железной дороге Санкт-Петербург–Москва курьерские поезда обращались с максимальной скоростью 110 км/ч. В 1910 г. на Сормовском заводе был построен скоростной паровоз, получивший индекс С, признанный одним из лучших европейских локомотивов своего времени (рис. 1).

В 1913 году в опытных поездках с паровозом серии С достигалась скорость 125 км/ч, а в 1915 г. с паровозом серии Л – максимальная скорость 117 км/ч.

Профессор Н. Л. Щукин с начала XX века вынашивал идею о введении в эксплуатацию между Санкт-Петербургом и Москвой скоростных поездов, однако начавшаяся война не позволила реализовать эти планы.

В 1938 году на магистрали Москва–Ленинград впервые в СССР была достигнута скорость 177 км/ч при испытании паровоза, изготовленного Коломенским заводом с осевой формулой 2–3–2 (число осей – передние бегунковые, ведущие, задние поддерживающие) и нагрузкой на ось 20,5 т. Поездки (опытные и эксплуатационные) производились на рельсах массой 43,6 кг/м.

В СССР в послевоенный период осуществлялся беспрецедентный Генеральный план технического перевооружения железнодорожной отрасли на основе электрификации. В 1960-х годах между Москвой и Ленинградом был проведён комплекс опытных поездок, в которых максимальная скорость достигала 220 км/ч.

В 1972 году в СССР были проведены опытные поездки пассажирского вагона с турбореактивным двигателем со скоростью 240 км/ч.



## Основные показатели ряда скоростных железных дорог в период около 1965 года

Страна	Участок (линия)	Протяжённость участка, км	Наименование экспресса	Максимальная скорость, км/ч	Маршрутная скорость, км/ч
СССР	Ленинград–Москва	650	«Аврора»	160	130,4
Великобритания	Лондон–Лестер	169,5	«Мидленд Пульман»	140	112
Италия	Рим–Неаполь	210	«Стрела Везувия»	140–160	120
США	Лос-Анджелес–Чикаго		«Супер-Чиф-Эль-Капитэн»	160	132
Франция	Париж–Марсель–Ницца	314	«Мистраль»	160	131
ФРГ–Швейцария	Дуйсбург–Женева	570	«Рейнгольд»	160	107

Данные по различным источникам значительно отличаются, в таблице приводятся некоторые из них в порядке информации, поскольку исследование данного вопроса находится за рамками статьи.

Первые проекты скоростной магистрали Москва–Ленинград разрабатывались ещё в 1930-х годах (К. Н. Кашкин, Г. Д. Дубилер, И. В. Романов). Самым известным скоростным поездом стала «Красная стрела». В первый рейс экспресс отправился из Ленинграда 9 июня 1931 г. Однако реально работы по организации железнодорожного движения с повышенными скоростями начались лишь в конце 1950-х гг.

Одним из первых документов, определивших программу повышения скоростей движения поездов на Октябрьской железной дороге, стал приказ Министерства путей сообщения от 29 мая 1957 г. «О подготовке линии Москва–Ленинград к движению пассажирских поездов с повышенными скоростями». В том же году на Октябрьскую железную дорогу поступили первые тепловозы ТЭ7, сыгравшие заметную роль в развитии скоростного движения. Максимальная скорость пассажирских поездов достигла 140 км/ч. Вся поездка от Москвы до Ленинграда длилась 5 ч 54 мин.

После укладки бесстыкового пути из рельсов Р65, замены стрелочных переводов, завершения электрификации и с использованием электровозов серии ЧС2 в 1964 г. на линии Москва–Ленинград ввели в обращение дневной экспресс «Аврора» с маршрутной скоростью 130,4 км/ч.

Результаты, достигнутые в скоростном движении на линии Ленинград–Москва к середине 1960-х годов, были сопоставимы с показателями скоростных железных дорог Японии, Франции, Италии, США и других лидирующих в этой области стран, что видно из табл. 1.

Первый в СССР скоростной поезд ЭР 200 («Электропоезд Рижский»), имевший максимальную скорость 200 км/ч, разработан и изготовлен в 1968–1974 гг. С 1984 г. электропоезд

ЭР 200 эксплуатировался на линии Москва–Ленинград. Время в пути поезда между конечными пунктами составляло 4 ч 30 мин, маршрутная скорость – 144 км/ч. Одновременно с ЭР 200 велась разработка ещё одного скоростного поезда, получившего наименование «Русская тройка», рассчитанного на скорость до 200 км/ч. Поезд должен был представлять собой состав постоянного формирования из вагонов РТ 200 Калининского (с 1990 г. Тверского) вагоностроительного завода и электровоза ЧС 200 (производства ЧССР). Было изготовлено восемь опытных вагонов, которые показали на испытаниях хорошие результаты, однако в коммерческой эксплуатации поезд «Русская тройка» не использовался.

С 1994 года в России осуществлялась отраслевая программа развития скоростного движения, в соответствии с которой были реализованы проекты создания специального подвижного состава на максимальные скорости движения до 200 км/ч скоростных пассажирских электровозов ЭП 100 постоянного тока и ЭП 200 переменного тока, пассажирских вагонов разного класса для скоростного движения.

В 2009 году на линии Москва–Санкт-Петербург начали эксплуатироваться скоростные поезда «Сапсан», произведённые в сотрудничестве с компанией Siemens. Максимальная скорость этих поездов – 250 км/ч. Расстояние 650 км преодолевается за 3 ч 45 мин. За первый же год было перевезено 2 млн пассажиров. Летом 2010 г. организовано движение поездов «Сапсан» на направлении Москва–Нижний Новгород.

В декабре 2010 г. началось регулярное движение скоростных поездов «Аллегро», производства компании Alstom, между Санкт-

Петербургом и Хельсинки. Максимальная скорость движения нового электропоезда по территории России – 200 км/ч, Финляндии – 220 км/ч. Время в пути на этом международном маршруте сократилось с 6 ч 18 мин до 3 ч 30 мин.

Одним из стратегических направлений инновационного развития ОАО «РЖД» является расширение высокоскоростного движения пассажирских поездов. О значении, которое придаётся высокоскоростному движению пассажирских поездов, свидетельствует подписанный 16 марта 2010 г. Президентом Российской Федерации Указ «О мерах по организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта в Российской Федерации».

### Вопросы выбора оптимальной скорости

В самом начале XX века инженер Б. Д. Воскресенский в труде «Теория работы железнодорожных поездов» в качестве основного критерия для решения вопроса о наиболее выгодном весе и скорости для грузовых поездов предложил определять величину  $\max QV_x$  на эквивалентном подъёме и пришёл к выводу, что на участках с лёгким профилем пути выгоднее водить тяжёлые составы с меньшими скоростями, а на участках с трудным профилем целесообразно водить поезда меньшего веса, но с более высокими скоростями.

Профессор А. Л. Васютинский, исходя из расчётов себестоимости перевозок, связанной с работой подвижного состава, пришёл к противоположному выводу, что по мере увеличения эквивалентного подъёма целесообразнее вес состава повышать, а скорость снижать.

Инженер В. Н. Щегловитов [4] справедливо поставил вопрос о нахождении не  $\max QV_x$ , а величины  $\max QV_{\text{уч}}$ , т.к. провозная способность участка определяется участковой (в то время коммерческой – авт.) скоростью, а не ходовой, причём с увеличением числа поездов на однопутном участке участковая скорость снижается. Отсюда делался вывод, что для однопутных участков наибольший состав является наиболее выгодным.

В 1920-х годах экономическую оценку скорости предложили определять влиянием мощности локомотивов на себестоимость перевозок:

$$\mathcal{E} = A + \frac{B}{Q},$$

где  $\mathcal{E}$  – полные эксплуатационные расходы;

A – расходы, не зависящие от веса состава;

B – расходы, зависящие от веса состава;

Q – вес состава.

Профессор И. И. Васильев в работе [5] пришёл к выводу, что для получения минимального расхода топлива на 1 т•км перевозки и достижения максимальной пропускной способности участка вес состава и скорость должны соответствовать при паровой тяге точке пересечения кривых, соответствующих ограничению силы тяги по сцеплению и котловой силе тяги.

Профессора А. М. Бабичков и В. Ф. Егорченко в книге [6, с. 247] пишут: «Для грузовых поездов за расчётную скорость на подъёме обычно принимается та наибольшая скорость, при которой полностью используется сила тяги локомотива по сцеплению и по генератору или машине, иначе говоря, скорость, соответствующая на диаграмме  $F_k = f(V)$  точке пересечения линии силы тяги по сцеплению с линией силы тяги по генератору или по машине. Эта скорость иногда называется скоростью порога или скоростью выхода на автоматическую характеристику, так как на диаграмме  $F_k = f(V, z)$  она соответствует точке перелома кривой силы тяги». Таким образом, исходным критерием при установлении веса состава авторы считают наилучшее использование силы тяги локомотива, определяющим также минимальное значение себестоимости перевозок.

Профессор В. Н. Орлов [7] сделал вывод, что наиболее выгодная ходовая скорость при неизменном весе поезда имеет минимум себестоимости перевозок, а на руководящем подъёме – наименьшую себестоимость перевозок при заданных размерах грузооборота.

Профессор А. И. Ионнисян [8] утверждал, что с повышением максимально допускаемой скорости для мощных локомотивов необходимо повысить также расчётные скорости на руководящем подъёме. Скорость на руководящем подъёме должна быть установлена по условиям достижения минимальной себестоимости перевозок.

Профессор А. Е. Гибшман [9] предложил метод непосредственного расчёта сравнимых типов паровозов на основе предварительного построения специальной сетки и оконтуренных линий зависимости издержек от веса и скорости движения поезда при различных размерах грузооборота.



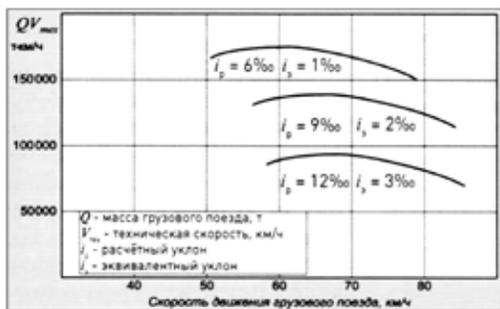


Рис. 2. Зависимость производительности локомотива от технической скорости.

В Правилах тяговых расчётов для поездной работы, изданных в 1956 г. и 1985 г. [10], предлагается вес и скорость движения поезда определять исходя из условий полного использования мощности локомотивов и кинетической энергии поезда, т. е. исходя из принципа реализации наибольшего возможного веса состава по мощности локомотива.

Ещё в середине XX века академик Т. С. Хачатуров исследовал проблему зависимости производительности локомотивов от скорости движения грузовых поездов и установил эту зависимость при различных величинах руководящего и эквивалентного уклонов (рис. 2). Для заданных руководящего и эквивалентного уклонов принимался начальный вес грузового поезда, для которого рассчитывался путь, проходимый за 1 час. Затем вес поезда пошагово увеличивался. Вначале поезд проходил расчётное расстояние с максимально реализуемой скоростью. При увеличении веса поезда его скорость снижалась, а производительность локомотива росла за счёт повышения веса поезда. При дальнейшем повышении веса поезда снижение скорости уже не компенсировалось увеличенным весом поезда, и производительность локомотива начала снижаться.

Профессор Б. Э. Пейсахзон [11] исследовал и разработал методику выбора оптимальных значений веса и скорости движения поездов для различных видов тяги, которая позволяет производить выбор новых типов и размещение существующих локомотивов на основе эксплуатационных требований и технико-экономических расчётов.

## Зарубежный опыт повышения скорости движения

История развития железнодорожного транспорта насчитывает немало достижений в области повышения скорости движения, часто они являлись своего рода техническими сенсациями. Ещё в 1847 г. в Англии на одном из участков Большой Западной железной дороги протяжённостью 92 км пассажирские поезда достигали скорости 93 км/ч. К концу XIX столетия в Великобритании, Франции, Германии, США пассажирские поезда развивали скорость 70–80 км/ч. В 1890 г. паровоз «Crampton» во Франции с поездом массой 157 т развил скорость 144 км/ч. Рубеж скорости 200 км/ч впервые преодолел немецкий электропоезд. В 1903 г. на участке Мариенфельде–Цёссен во время испытаний была достигнута скорость 210 км/ч.

В 1955 г. во Франции впервые превышен рубеж 300 км/ч и установлен рекорд скорости – 331 км/ч. Этот рекорд был улучшен 28 февраля 1981 г. – поезд TGV достиг скорости 380 км/ч.

Продолжающиеся в этой области работы показывают, что традиционная транспортная система колесо–рельс не исчерпала своих возможностей. В 1988 г. в Германии при испытаниях экспериментального поезда ICE реализована скорость 406,9 км/ч. Но и этот рубеж вскоре был превзойдён: в 1989 г. поезд TGV во Франции достиг скорости 412 км/ч, затем 482,4 км/ч и, наконец, в мае 1990 г. был установлен невероятный рекорд скорости – 515,3 км/ч.

Впервые в мире идея высокоскоростного железнодорожного движения была реализована в Японии (рис. 3), между городами Токио и Осака, где в 1964 г. была сдана в эксплуатацию высокоскоростная магистраль Токайдо протяжённостью 516 км. Максимальная скорость движения на новой линии составляла 210 км/ч, а поездка из Токио в Осака занимала 3 ч 10 мин.

Благодаря высокой скорости и комфорту высокоскоростные поезда завоевали широкое признание у населения. Уже через пять лет перевозки пассажиров на этой линии возросли более чем в два раза и достигли 70 млн чел. в год. Столь значительные объёмы работы обеспечили прочную основу экономической эффективности высокоскоростной магистрали и позволили японским железным дорогам планировать дальнейшее строительство таких линий.

В 1970 г. в Японии принят закон о создании общенациональной сети высокоскоростных железнодорожных линий, которая получила название Синкансен. Это дало новый импульс развитию высокоскоростного движения. В 1975 г. вступила в строй высокоскоростная линия Саньё. Перешагнув через пролив, эта линия достигла города Фукуока, соединив два острова – Кюсю и Хонсю.

1982 г. ознаменовался открытием ещё двух новых высокоскоростных магистралей (ВСМ): линии Тохоку, расположенной к северу от Токио и связывающей города Омия и Мариока, и линии Дзеецу, пересекающей остров Хонсю от побережья Японского моря до побережья Тихого океана на маршруте Омия–Ниигата. В начале 2000-х годов протяжённость высокоскоростной железнодорожной сети в Японии, включающей в себя шесть магистралей, превысила 2100 км, а максимальная скорость обращающихся по ней поездов составляет 240–260 км/ч (рис. 4).

Магистрали Синкансен предназначены только для пассажирского движения. В отличие от обычных железных дорог, которые имеют узкую колею, ширина колеи высокоскоростных линий соответствует европейскому стандарту и составляет 1435 мм. В результате поезда типа Синкансен вынуждены обращаться в замкнутой системе. Высокоскоростные магистрали заходят непосредственно в центры городов и населённых пунктов, пересекая их на эстакадах высотой 25–30 м.

При создании сети Синкансен японскими специалистами решён ряд сложнейших инженерных задач, связанных с выбором путей структуры, созданием нового подвижного состава, искусственных сооружений и других технических средств.

Особое место в этих разработках занимают устройства обеспечения безопасности движения. Принцип их работы заключается в том, что при возникновении любой неисправности или нарушении режима работы, создающих угрозу безопасности, поезд немедленно останавливается. Для наземных видов транспорта это означает устранение опасности. Практика доказала высокую эффективность применяемой системы безопасности. За всё время эксплуатации линий Синкансен не было ни одной аварии или крушения, не погиб и не был ранен ни один



Рис. 3. Первый высокоскоростной электропоезд (Япония).

пассажира. А перевезено к концу 1990-х годов около 3 млрд чел.

Ежесуточно по магистрали Синкансен курсирует 427 скоростных экспрессов, которые перевозят более 440 тыс. чел.

Ведутся большие работы по созданию поездов нового поколения с целью достижения на уже имеющейся сети ВСМ Японии скорости 300–350 км/ч. Поскольку постоянные устройства этой сети были рассчитаны на скорость до 250 км/ч, потребовалось существенно снизить нагрузку на ось. Это было достигнуто – в опытном поезде нагрузка на ось составляет меньше 8 т.

Идеологом высокоскоростных железнодорожных систем в Европе является Франция. После двух лет теоретических разработок в 1976 г. общество железных дорог (SNCF) приступило к строительству высокоскоростной магистрали Париж–Лион, а в сентябре 1981 г. на линии был дан зелёный свет высокоскоростному поезду TGV (рис. 5). Проектирование системы TGV велось таким образом, чтобы поезда могли курсировать по новой линии со скоростью 270 км/ч, и переходить на обычную железнодорожную сеть. Благодаря этому была обеспечена ускоренная железнодорожная связь Парижа с юго-восточными районами Франции. В настоящее время поезда TGV юго-восточного направления обслуживают более 50 населённых пунктов, в которых проживает 56 % населения страны. Протяжённость сети TGV–Юго-восток составляет 2487 км, из которых 417 км приходится на новую линию.

Резко возросла коммерческая скорость движения. В сообщении Париж–Лион она составляла 213 км/ч, а время в пути между этими городами сократилось до 2 ч.

Базируясь на первых успехах, французское общество железных дорог предложило, а пре-





Рис. 4. Японский высокоскоростной электропоезд серии 300.



Рис. 5. Французский высокоскоростной двухэтажный электропоезд TGV Duplex.

зидент республики и правительство приняли решение о строительстве новой высокоскоростной линии TGV–Атлантик, пуск в эксплуатацию которой состоялся в сентябре 1989 г. Общая длина магистрали составляет 285 км.

Так же, как и линия TGV–Юго-восток, новая высокоскоростная магистраль предназначена исключительно для пассажирских перевозок. Для Атлантической линии создано новое поколение высокоскоростных поездов TGV–Атлантик, максимальная скорость которых при коммерческой эксплуатации на вновь построенных участках составляет 300 км/ч, а на обычных железнодорожных линиях – 220 км/ч.

Затем были введены в эксплуатацию ВСМ «Север» – направление на Бельгию и к тоннелю под Ла-Маншем (332 км); обходная ВСМ вокруг Парижа, соединившая в единую сеть высокоскоростные линии Франции и ряда европейских стран (102 км). Общая протяжённость ВСМ Франции к 2014 г. составляла почти 1500 км, и строительство ещё нескольких линий продолжилось.

Французская концепция высокоскоростного подвижного состава предусматривает создание поездов постоянного формирования с локомотивной тягой. Два электровоза помещаются по концам состава, а между ними располагаются пассажирские вагоны. Особенностью французского поезда TGV является использование сочленённых вагонов на промежуточных тележках.

В Германии первая линия ВСМ появилась в 1991 г., сегодня протяжённость таких линий составляет 800 км (рис. 6). В Испании и Италии высокоскоростные магистрали длиной соответственно 471 и 236 км были введены в 1992 г.

В 1992 г. в Швеции начали курсировать поезда, состоящие из вагонов с принудительным наклоном кузовов. Такие поезда развивают скорость 220 км/ч. В разных странах уже создано до 20 типов таких вагонов.

В Великобритании усовершенствуются три основных маршрута: Лондон–Глазго,

Лондон–Ньюкастл–Эдинбург и Лондон–Бристоль–Кардифф для реализации скоростей 225 км/ч.

Вслед за Европой и Японией высокоскоростное движение получает развитие и в США, где долгое время главную роль играли автомобильный и воздушный виды транспорта. В США имеется семь проектов создания систем высокоскоростного железнодорожного транспорта. Одни из них находятся в стадии рассмотрения, по другим проведены научные исследования и предпроектные разработки. В настоящее время наивысшая скорость (240 км/ч) для пассажирских поездов реализуется на одном из участков в так называемом Северо-Восточном коридоре между Вашингтоном и Нью-Йорком. На новых магистралях скорости движения будут достигать 270–300 км/ч.

Работы по созданию сверхскоростных железнодорожных магистралей ведутся практически на всех континентах. О намерениях построить высокоскоростную линию между городами Сидней и Мельбурн объявила Австралия. Высокоскоростные поезда для неё будут поставляться ведущими фирмами Франции и ФРГ, которые преуспели в создании поездов типов TGV и ICE. Германские предприятия должны поставить Австралии сверхскоростные локомотивы, а французские – вагоны. На новой 870-километровой линии будут курсировать 30 пар поездов со средней скоростью 292 км/ч и максимальной 350 км/ч.

Данный обзор в контексте статьи не охватывает развитие ВСМ в последние годы с точки зрения совершенствования инфраструктуры, строительства новых высокоскоростных линий, создания подвижного состава, чему, в том числе и применительно к ускоренному развитию ВСМ в КНР, посвящено большое число исследований, ставя задачу показать эволюцию скорости поездов. При этом нельзя не отметить ряд связанных аспектов.

На высокоскоростных линиях конструкция пути, устройства СЦБ и связи в основном сохраняют традиционные принципы.

Однако они становятся качественно новыми по наукоёмкости, надёжности и способам содержания. Их необходимыми элементами являются микропроцессоры и ЭВМ, диагностические и информационные датчики, приборы тонкой чувствительности для определения землетрясений, снегопадов и других ситуаций. Всё это в двойном, а иногда в тройном резервировании обеспечивает 100 % безопасность движения.

Основными тенденциями в создании новых типов высокоскоростных электропоездов являются максимальное облегчение конструкции вагонов, уменьшение энергопотребления благодаря высоким аэродинамическим показателям, применение ЭВМ и микропроцессорных устройств, а также новых, более экономичных и надёжных систем, электрооборудования для тяги.

В настоящее время система ВСМ технически, технологически и экономически апробирована. Высокоскоростные магистрали уже построены, строятся или проектируются во многих странах мира на протяжении почти 50 лет. Высокая эффективность ВСМ доказана, и поэтому, сегодня любая страна, если для этого имеются необходимые экономические условия, может проектировать и строить ВСМ, используя известные технические и технологические решения.

### Современные исследования

Повышение и оптимизация скорости движения поездов – приоритетные задачи ОАО «РЖД». Решением этих задач занимается практически весь научный потенциал отрасли.

Канд. экон. наук А. В. Кудрявцева [12] исследовала долгосрочную динамику весов и скоростей грузовых поездов с точки зрения инновационного развития железнодорожного транспорта и обобщила получаемые экономические эффекты от повышения этих показателей.

Специалисты АО «ИЭРТ» [3] при анализе повышения скорости грузовых поездов на участке Барабинск–Татарская–Московка с 80 до 90 км/ч сделали вывод, что показатели экономической эффективности зависят от наличия (или отсутствия) резервов пропуск-



Рис. 6. Немецкий высокоскоростной электропоезд ICE 3.

ной способности инфраструктуры, возможности привлечения дополнительных объёмов грузовых перевозок или оптимизации перевозочного процесса за счёт переключения (возврата) грузопотоков на кратчайшие маршруты, наличия дополнительной грузовой базы, подтверждённой соответствующим прогнозом, размеров движения по рассматриваемому участку, стоимости мероприятий, направленных на повышение скорости движения.

Специалисты АО «ВНИИЖТ» [13] исследовали возможности упорядочить технологию движения грузовых поездов за счёт актуализации графика движения, разрабатываемого с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК) ЭЛЬБРУС, что позволило увеличить участковую и маршрутную скорости на направлении Исылькуль–Челябинск Южно-Уральской дороги.

Специалисты ДВГУПС [14] с помощью системы сетевого планирования и управления (СПУ) и программного комплекса ЭРА исследовали зависимость технической и участковой скоростей от установленной допускаемой скорости движения поездов. Расчёты показали экономическую эффективность повышения средних скоростей движения за счёт планирования и управления увеличением допускаемых скоростей движения поездов на полигонах сети.

Специалисты СамГУПС [15] на направлении Кузбасс–Челябинск–Сызрань–им. М. Горького–Тихорецкая–порты Азово-Черноморского бассейна проанализировали взаимодействия скорости движения поездов с другими объёмными и экономическими показателями. Получена зависимость между скоростью движения поездов и пропускной способностью участка. Но характер кривой свидетельствует о неизменной длине блок-участков, в то время как с повышением скорости движения поездов длина блок-участков должна увеличиваться, и при высокоскорост-





ном движении это приводит даже к уменьшению пропускной способности.

Специалисты РГУПС [16] исследовали влияние повышения скоростей движения грузовых поездов на оценку доходов и расходов. Проанализированы факторы, влияющие на скорость. Рассмотрена целесообразность разделения грузового и пассажирского движения. Для Северо-Кавказской дороги установлена зависимость между рабочим парком вагонов, участковой скоростью и бюджетными показателями.

В последние десятилетия разрабатываются и реализуются руководящие указания ОАО «РЖД», программы, методические рекомендации и проекты, направленные на повышение скорости движения поездов.

### АНАЛИЗ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

При максимальных размерах движения и минимальных межпоездных интервалах поток поездов становится неустойчивым, а процесс движения нестационарным. Различная квалификация машинистов, современная конструкция скоростемеров и другие факторы не позволяют реализовать максимально допустимую скорость.

Расшифровка скоростемерных лент показала, что машинисты грузовых поездов почти всегда следуют со скоростью меньше расчётной или установленной предупреждением об ограничении. При следовании поездов под зелёный на зелёный огонь путевого светофора, т.е. когда расстояние между поездами более трёх блок-участков, расчётная норма ходовой скорости в среднем не выполняется на 20 %, а графиковая – на 8 %. Когда расстояние между поездами менее трёх и более двух блок-участков и часть пути они следуют на жёлтый огонь, средняя скорость соответственно ниже нормы на 46 и 38 %, после проследования же путевого светофора с жёлтым огнём – на 63 %. Фактическая скорость движения поездов отличается от расчётной в широком диапазоне от 0,2 до 1,2. Большой разброс скоростей объясняется, прежде всего, разной квалификацией машинистов, неодинаково реагирующих на показания светофоров, зачастую осуществляя преждевременное торможение.

Увеличение средних скоростей движения поездов обычно вызывает повышение удельного расхода электроэнергии или топлива, так как при этом возрастают основное со-

противление движению и потери энергии в тормозах. Увеличение средних скоростей движения обеспечивает наибольший экономический эффект при рациональном режиме вождения поездов, который при строгом соблюдении графика движения вызывает наименьший удельный расход электроэнергии или топлива. Сложность разработки и практического использования рациональных режимов вождения поездов заключается в том, что они различны для разных эксплуатационных условий, при электрической тяге подвержено изменению напряжение в контактной сети, в зависимости от технического состояния отличаются характеристики электрических машин на локомотивах. Составленные для некоторых средних эксплуатационных условий карты режимов вождения поездов на одних и тех же участках у различных машинистов имеют отклонения как в большую, так и в меньшую сторону от установленной нормы удельного расхода электроэнергии, топлива. Стремление машинистов добиться экономии расхода электроэнергии или топлива приводит к снижению скорости движения грузовых поездов.

Любое снижение скорости движения поездов по сравнению с расчётной скоростью для данного участка, а тем более перерыв в движении приводят к потерям в использовании пропускной способности и соответственно к экономическим потерям. Задержки поездов на перегонах вызываются: несинхронностью движения поездов, несвоевременным открытием сигналов на станциях, возникновением неисправностей подвижного состава и технических устройств, перенасыщением участков поездами, наличием предупреждений об ограничении скорости движения и пропуском опаздывающих пассажирских поездов.

При несинхронности движения поезда следуют вместо зелёного на жёлтый, а часто и на красный огонь светофора. Так, если пачка поездов следует с шестиминутными межпоездными интервалами и один из локомотивов снизит скорость движения против средней графиковой всего лишь на 5 км/ч, идущий за ним поезд через 1,5 мин подойдёт к светофору с жёлтым огнём. Несинхронность следования объясняется тем, что машинисты пользуются расписанием движения поездов, в котором указано только время хода по перегонам. Скорость следования на

различных элементах профиля пути определяют экспертно, выбор режима движения во многом зависит от квалификации машинистов.

По некоторым оценкам, около 1 млн поездо-часов в год составляют задержки поездов из-за несвоевременного приёма их техническими станциями, также велики задержки перед стыковыми пунктами из-за несвоевременного приёма поездов соседними дорогами и отделениями.

На задержки поездов при возникновении неисправностей вагонов, локомотивов, пути, устройств СЦБ и связи, контактной сети и др. влияют средства связи по движению поездов, число главных путей, вид тяги, межпоездной интервал и количество пассажирских поездов. Отказы в работе технических устройств сокращают наличную пропускную способность участков до 15 %.

Увеличение плотности поездопотока ведёт к росту числа поездов, следующих на жёлтый и красный огни светофоров, а это вызывает уменьшение ходовой скорости и увеличение времени задержки поездов на перегонах.

Анализ записей скоростемерных лент позволяет установить режим движения поездов на участке при различной плотности и интенсивности поездопотока, доле различных показаний светофоров и АЛСН и скорости движения на них, реализуемые техническую и участковую скорости грузовых поездов. Показания скоростемерных лент могут использоваться как самостоятельно, так и в качестве исходной информации для моделирования движения поездов на участке. В последнем случае, в отличие от результатов тяговых расчётов, учитывается человеческий фактор (влияние машиниста на режим ведения поезда).

Для сопоставления скорости движения поездов, полученной с помощью тяговых расчётов и скоростемерных лент, целесообразно использовать их отношение при следовании на различные показания путевых светофоров или АЛСН.

$\frac{v_z}{v_p}, \frac{v_{жк}}{v_p}, \frac{v_{кжк}}{v_p}$  – отношение фактической

и расчётной скорости движения поездов соответственно на зелёный, жёлтый и после проследования жёлтого огня путевого светофора (рис. 7, 8).

На разных участках разные машинисты по-разному реализуют допускаемые скорости движения поездов. Но при отличии конкретных значений скорости движения поездов, их распределения и соотношения имеют общий вид (рис. 7, 8). Общей закономерностью явилось следование на зелёное показание светофора на одной половине блок-участков со скоростью на 20–25 % ниже расчётной и на другой – почти в два раза меньше, чем получено тяговыми расчётами. На второй половине блок-участков такое снижение скорости связано с наличием ограничений скорости и разгоном после их проследования, которое осуществлялось медленнее по сравнению с расчётным режимом. Снижение значений соотношения  $\frac{v_{жк}}{v_p}$  объясняется установленным

на железных дорогах ограничением скорости при следовании на светофор с жёлтым показанием и преждевременным торможением малой эффективности. Причём в 75 % случаев при следовании поездов на жёлтый огонь показание светофоров менялось на зелёное показание и зарегистрированных торможений могло вообще не быть.

Фактические скорости движения поездов рассматривались по отношению к скоростям, полученным тяговыми расчётами. Но в нормативных графиках движения используются скорости ниже расчётных. На рассмотренных электрифицированных участках в графике движения ходовая скорость грузовых поездов  $v_{гр} = 57,7$  км/ч меньше расчётной на 8,7 км/ч. Поэтому отношение скоростей  $v_z, v_{жк}$  и  $v_{кжк}$  к графической норме ходовой скорости больше в  $66,4:57,7 = 1,15$  раза (табл. 2). При следовании поездов на зелёное показание светофоров ходовая скорость ниже расчётной на 20 %, а графической – на 8 %. На жёлтое показание светофоров поезда следуют с ходовой скоростью соответственно ниже на 46 и 38 %. После проследования же путевого светофора с жёлтым огнём – ниже на 63 %.

Результаты, полученные на участках с тепловозной тягой, приведены в табл. 3. Различие отношений скоростей в нечётном (гружёном) и чётном (порожном) направлениях объясняется почти в два раза меньшим весом порожних поездов, медленным разгоном гружёных поездов после проследования участков с ограничениями скорости и более высокими скоростями движения



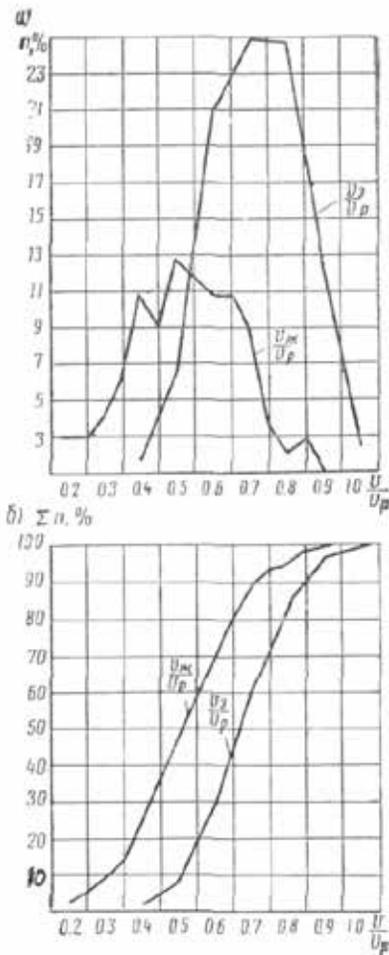


Рис. 7. Дифференциальные (а) и интегральные (б) кривые распределения скоростей при движении поездов на различных показаниях светофора на электрифицированном участке.

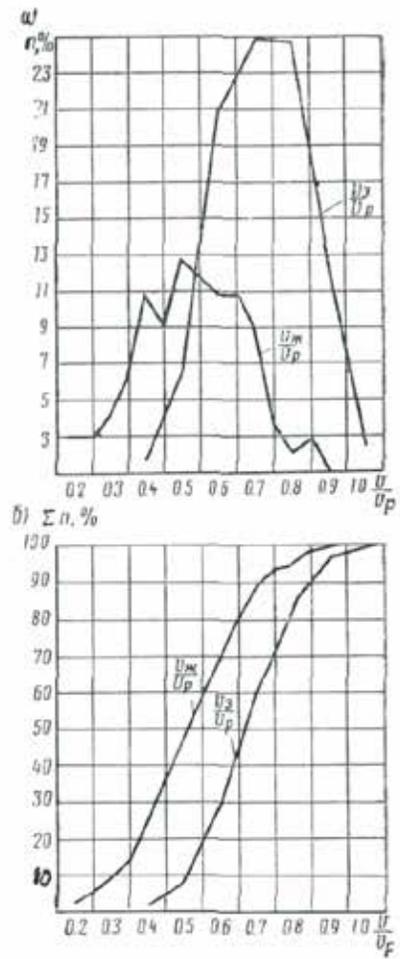


Рис. 8. Дифференциальные (а) и интегральные (б) кривые распределения скоростей при движении поездов на различных показаниях светофора на участке с тепловозной тягой.

порожних поездов на зелёные и жёлтые показания светофоров.

Отношение фактических скоростей движения поездов к расчётным при проследовании промежуточных станций по главному пути, когда на входном и выходном светофорах зелёный огонь, на электрифицированных линиях в среднем равно 0,78, на участках с тепловозной тягой – 0,75, что на 7–8 % или 5–6 км/ч ниже, чем на перегонах.

Фактическое число предупреждений об ограничении скорости движения поездов на многих участках сети больше, чем предусмотрено графиком. Общее расстояние, проходимое поездом с ограничением скорости  $l_{\text{ор}}$ , равно сумме протяжённости действия предупреждения  $l_{\text{пр}}$ , длине поезда  $l_{\text{п}}$  и расстояния, проходимого с пониженной скоростью  $v_{\text{ор}}$  с учётом замедления и разгона поезда до

и после места, где ограничена скорость. Фактическое расстояние, проходимое поездом с ограничением скорости, в среднем в 2,5 раза больше протяжённости пути действия предупреждения. Анализ скоростемерных лент показал, что фактическая скорость ниже установленной предупреждением в среднем на 20–25 %. Количество поездов, на которые влияет ограничение скорости на подходе к месту его действия:

$$N = \frac{(v_{\text{ср}} - v_{\text{ор}})l_{\text{ор}}}{v_{\text{ор}}(v_{\text{ср}}I - l_{\text{п}} - pL_{\text{б-у}})} - 1,$$

где  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость движения поездов, км/ч;

$I$  – межпоездной интервал, ч;

$p$  – минимальное число блок-участков, разграничивающих поезда, при котором обеспечено устойчивое движение на зелёный

Таблица 2

**Отношение фактических скоростей движения к расчётным и графиковым на электрифицированных участках**

Режим движения поездов на сигналы автоблокировки	Число случаев	$\frac{v}{v_p}$	$\frac{v}{v_{gp}}$
На зелёное показание светофора	1795	0,80	0,92
На жёлтое показание светофора	543	0,54	0,62
После проследования жёлтого показания светофора	125	0,32	0,37

Таблица 3

**Отношение фактических скоростей движения к расчётным и графиковым на участках с тепловозной тягой**

Режим движения поездов на сигналы автоблокировки	Нечётное направление		Чётное направление	
	Число случаев	$\frac{v}{v_p}$	Число случаев	$\frac{v}{v_{gp}}$
На зелёное показание светофора	1060	0,77	778	0,85
На жёлтое показание светофора	140	0,55	77	0,67
После проследования жёлтого показания светофора	—	—	29	0,46

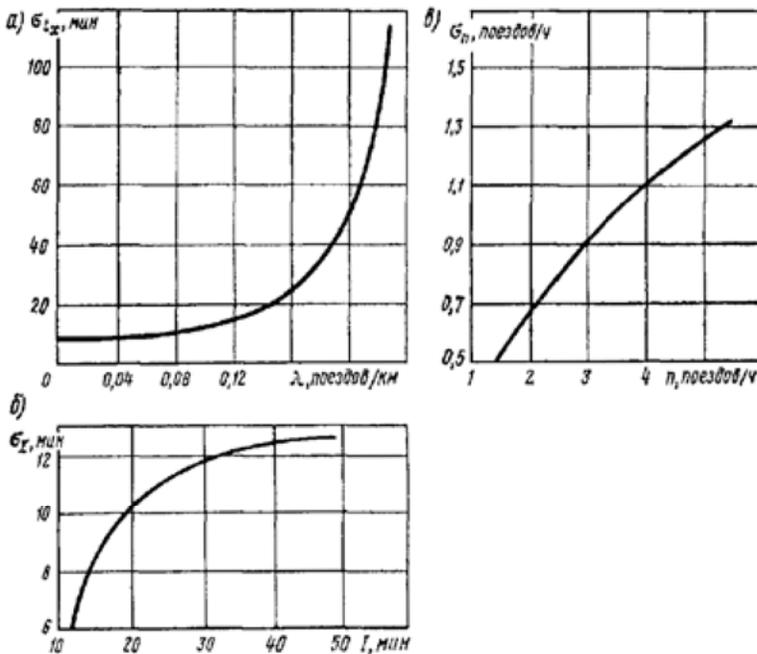


Рис. 9. Зависимость среднего квадратичного отклонения времени хода поездов от плотности потока (а), межпоездного интервала (б), интенсивности движения поездов (в).

огонь светофора (для трёхзначной автоблокировки  $p = 3$ );

$L_{б-у}$  – средняя длина блок-участка, км.

Фактическая скорость движения поездов в местах действия предупреждений на  $2,7 \div 5,6$  км/ч меньше, чем установлена ограничениями.

Исследования показали, что увеличение плотности потока поездов приводит к увели-

чению среднего времени прохождения ими участка. Чтобы оценка рассеяния (абсолютные размеры колебаний) имела размерность случайной величины, используем среднее квадратичное отклонение и вычислим его значения для времени хода поездов по участку (рис. 9а), межпоездных интервалов (рис. 9б) и интенсивности движения поездов (рис. 9в).



Изменение скорости движения в зависимости от расстояния между поездами

Пространственный интервал между поездами	Соотношение $S_1 : S$ при длине блок-участков, км			Скорость $v_1$ , км/ч	
	1,5	2,0	2,5		
$3 \cdot l_{\text{бл}}$	1,0	1,0	1,0	80	70
$2,75 \cdot l_{\text{бл}}$	0,92	0,92	0,92	73,6	64,4
$2,50 \cdot l_{\text{бл}}$	0,83	0,83	0,83	66,4	58,1
$2,25 \cdot l_{\text{бл}}$	0,75	0,75	0,75	60,0	52,5
$2 \cdot l_{\text{бл}}$	0,67	0,67	0,67	53,6	46,9

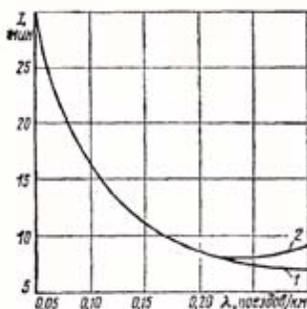


Рис. 10. Влияние плотности потока поездов на средний интервал между поездами на входе (1) и выходе (2) с участка.

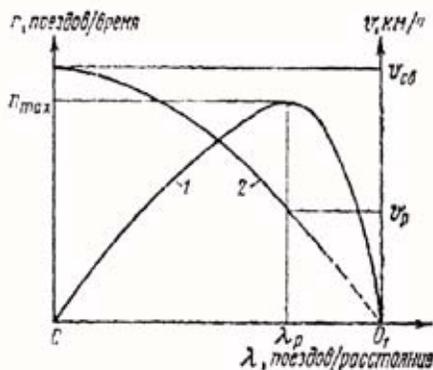


Рис. 11. Диаграмма потока поездов: 1 –  $n(\lambda)$ ; 2 –  $v(\lambda)$ .

Наличие рассеяния возможных значений вокруг среднего значения характеристик потока поездов свидетельствует о несинхронности движения поездов, которая присутствует даже при свободном движении одиночного поезда и возрастает с увеличением загрузки участка. Несинхронность движения вызывает такое влияние поездов друг на друга, что средний фактический межпоездной интервал больше расчётного и интенсивность движения потока поездов на выходе с участка меньше, чем на входе.

При сближении поездов их расчётная скорость  $v$  снижается до  $v_1$  и уменьшается использование пропускной способности. В этом случае:

$$\frac{Tv}{60S} = \frac{Tv_1}{60S_1}, \text{ откуда } \frac{v_1}{v} = \frac{S_1}{S} \text{ и } v_1 = \frac{S_1}{S} \cdot v.$$

Чтобы не допустить снижения использования пропускной способности, скорость движения поездов может снижаться пропорционально сокращению расстоянию между поездами (табл. 4).

При сокращении межпоездного интервала на половину блок-участка по сравнению с расчётной нормой скорость снижается на 11,9–13,6 км/ч и составляет 0,83 от расчётной. При дальнейшем уменьшении межпоездного интервала до  $S_1 = 2l_{\text{бл}}$ , когда поезд следует на жёлтый огонь светофора, скорость должна

быть равна 0,67 расчётной. Анализ скоростемерных лент подтвердил, что с увеличением плотности поездопотока скорость значительно снижается. Это уменьшение скорости сокращает использование пропускной способности до  $n_1$ , тогда:

$$\frac{n_1}{n} = \frac{60Tv_1S}{60TvS_1} = \frac{v_1S}{vS_1}.$$

Снижение использования пропускной способности при  $v_1$  и  $S_1$  определяется по формуле:

$$\Delta n = \left(1 - \frac{v_1S}{vS_1}\right) 100 \%.$$

Исследования последовательного увеличения размеров движения на участке показали, что при увеличении насыщенности участка поездами возрастает их влияние друг на друга, и они всё чаще следуют на жёлтый и красный сигналы светофора. В результате снижается скорость движения поездов. Увеличивается время занятия поездами блок-участков, возникает и возрастает очередь в ожидании пропуска по участку.

Моделированием движения поездов установлено, что увеличение плотности потока вызывает разницу интервалов между поездами на входе и выходе с участка (рис. 10).

Графики зависимостей  $n(\lambda)$  и  $v(\lambda)$  изменения интенсивности потока и скорости движения от плотности представлены на диаграмме

потока поездов (рис. 11). На ней отражены многие свойства транспортного потока, особенно пространственно-временные соотношения и возможность возникновения помех для движения поездов.

В точках 0 и  $0_1$  интенсивность движения равна нулю, т.е. по существу нет движения или поток поездов находится в состоянии затора (неподвижности). По мере увеличения плотности потока поездов снижается его скорость, высокие значения которой могут быть получены лишь при малых значениях плотности, т.е. в условиях относительно свободного движения поездов. Это имеет большое практическое значение. При нормировании показателей эксплуатационной работы, оперативном планировании и регулировании движения поездов следует учитывать, что увеличение плотности потока (размеров движения) вызывает снижение скорости движения поездов, а при перенасыщении участков поездами – и снижение использования наличной пропускной способности.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СКОРОСТИ С ДРУГИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПОТОКА ПОЕЗДОВ

Исходя из основных характеристик потока поездов, пропускную способность участка можно описать формулой:

$$n = \lambda v, \quad (1)$$

где  $n$  – интенсивность движения, поездов/ч;

$\lambda$  – плотность потока, поездов/км;

$v$  – скорость движения поездов, км/ч.

Если известны две из этих трёх переменных, то третья определяется однозначно. Среди рассматриваемых переменных нет такой, что зависела только от одного параметра. Однако поскольку интенсивность является количественной характеристикой перевозочного процесса, а скорость отражает уровень технического оснащения участков и развития подвижного состава, то их следует считать независимыми переменными, а плотность – зависимой. Соотношение (1) можно наглядно изобразить в виде поверхности в трёхмерном пространстве. Кроме перечисленных уже средних значений, большое практическое и теоретическое значение имеет определение следующих величин:

$n_{\max}$  – максимальная интенсивность движения;

$v_{\text{св}}$  – скорость движения поездов в свободных условиях (в соответствии с тяговыми расчётами или графиком движения);

$v_p$  – скорость, при которой интенсивность движения максимальна ( $n = n_{\max}$ );

$\lambda_{\max}$  – максимальная плотность, при которой движение поездов невозможно ( $v > 0$ );

$\lambda_p$  – плотность, при которой интенсивность движения максимальна ( $n = n_{\max}$ ).

Зависимость «интенсивность–плотность» (рис. 12) является основной диаграммой потока поездов. С ростом плотности потока поездов интенсивность увеличивается до максимального значения  $n_{\max}$ , соответствующего наличной пропускной способности участка (точка  $B$ ). Начиная с этой точки, увеличение интенсивности на входе участка не приводит к её увеличению на выходе, о чём свидетельствует снижение интенсивности при дальнейшем увеличении плотности потока. Вертикальная пунктирная линия, проведённая из точки  $B$ , как бы разделяет условия движения поездов без задержек (слева) и с задержками (справа). Точка  $A$  характерна для свободных условий движения поездов без задержек. Точка  $C$  находится в зоне условий движения с задержками и показывает, что такой же интенсивности можно достигнуть при значительно меньшей плотности потока (0,16 поездов/км), т.е. содержание избытка рабочего парка вагонов не приводит к увеличению количественных показателей, а, наоборот, уменьшает их и ухудшает качественные показатели эксплуатационной работы. Если же на конкретно взятом участке (рис. 12) необходимо увеличить интенсивность, то плотность потока поездов следует довести до 0,214 поездов/км.

Для характеристики использования пропускной способности участка будем пользоваться уровнем загрузки, который представляет отношение достигнутой интенсивности движения  $n$  к максимальной  $n_{\max}$  данного участка, т.е.  $\gamma = n/n_{\max}$ . С помощью этого понятия можно получить сопоставимые характеристики потока поездов на различных участках, так как  $\gamma$  – величина безразмерная и может принимать любые значения от 0 до 1.

В зависимости от скорости потока и его плотности (см. рис. 12) начальный участок кривой соответствует свободному движению поездов. При увеличении плотности потока скорость движения уменьшается в связи с уменьшением среднего межпоездного интервала и возрастанием влияния поездов друг на друга. Скорости движения  $v_{\text{св}}$  в свободных условиях соответствует точка  $A$ . Эта скорость



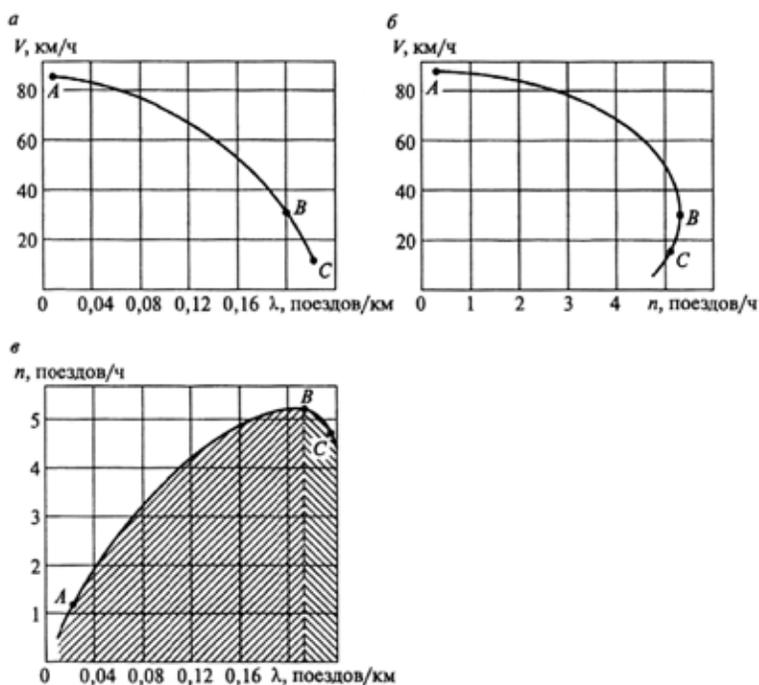


Рис. 12. Зависимость между скоростью потока поездов, интенсивностью и плотностью его движения.

определяется тяговыми расчётами. Зависимость не пересекает вертикальную ось, а приближается к ней асимптотически. Качественное состояние потока поездов можно характеризовать с помощью понятий коэффициента скорости движения и уровня насыщения участка поездами.

Коэффициент скорости движения  $u$  – это отношение максимально допустимой скорости  $v_d$  при достигнутой плотности к скорости свободного движения  $v_{св}$ :

$$u = v_d / v_{св}$$

Коэффициент скорости движения позволяет оценить влияние различной плотности потока на скорость. Величина  $u$  безразмерная и может принимать любые значения в диапазоне от 1 до 0.

Уровень насыщения участка – это отношение плотности потока при различных размерах движения  $\lambda_d$  к максимальной плотности  $\lambda_{max}$ :

$$\zeta = \lambda_d / \lambda_{max}$$

При увеличении интенсивности до максимального значения  $n_{max}$ , соответствующего точке B, скорость уменьшается (см. рис. 12). Часть кривой, расположенной выше точки B, соответствует нормальным условиям движения без задержек поездов, нижняя часть

кривой – условиям движения с задержками. Точки A и C на кривой «скорость – интенсивность» соответствуют аналогичным точкам на кривой «интенсивность–плотность». Зависимости на рис. 12 получены на основе моделирования движения потока поездов с помощью ЭВМ.

Важнейшей характеристикой участков является максимальная интенсивность потока поездов (пропускная способность). От использования пропускной способности и оптимизации её развития во многом зависит удовлетворение потребностей грузовладельцев и населения в перевозках грузов и пассажиров.

Плотность потока поездов может приниматься часовая, суточная, месячная, годовая и за соответствующий период будет получена пропускная способность, но формула (1) верна лишь при небольшой загрузке участка поездами. Поскольку увеличение плотности потока поездов приводит к уменьшению скорости движения, правильная функциональная форма выражения (1) будет иметь вид:

$$n(\lambda) = \lambda v(\lambda). \tag{2}$$

Скорость движения поездов распределена в пределах некоторого диапазона (см. рис. 13), поэтому целесообразно определять два вида

средних скоростей (пространственную и временную) и соответственно две плотности распределения вероятностей скоростей  $v$ .

Пространственная плотность распределения скоростей  $f_s(v)$  определяется для поездов, занимающих участок в заданный момент времени, временная плотность распределения скоростей  $f_t(v)$  – для поездов, проходящих данную точку участка в течение заданного интервала времени. Тогда средние пространственная и временная скорости:

- для двухпутных участков:

$$\bar{v}_s = \int_0^{v_{\max}} v f_s(v) dv ; \quad (3)$$

$$\bar{v}_t = \int_0^{v_{\max}} v f_t(v) dv ; \quad (4)$$

- для однопутных участков:

$$\bar{v}_s = \int_0^{v_{\max}} |v| f_s(v) dv ; \quad (5)$$

$$\bar{v}_t = \int_0^{v_{\max}} |v| f_t(v) dv . \quad (6)$$

В формулах (3) и (4) нижний предел принят равным нулю, так как по каждому отдельно взятому пути двухпутного участка нет встречного движения. Нижний предел в формулах (5) и (6) показывает, что на однопутных участках поезда следуют в прямом и обратном направлениях.

Для теории потоков поездов представляют интерес гармонические средние скорости  $\bar{v}_s$  и  $\bar{v}_t$ , основанные на соответствующих плотностях распределения; например, для двухпутного участка:

$$\bar{v}_s = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{v} f_s(v) dv} ; \quad (7)$$

$$\bar{v}_t = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{v} f_t(v) dv} . \quad (8)$$

Необходимость применения в некоторых случаях гармонической средней скорости проиллюстрируем на простом примере, из которого видно, какие трудности возникают при рассмотрении потока поездов. Допустим, что три поезда преодолели перегон длиной 10 км со скоростями 40, 50 и 60 км/ч. Очевидно, что средняя скорость равна 50 км/ч. Аналогично среднее время движения равно 0,206 ч. Однако эти значения (10 км, 50 км/ч, 0,206 ч) не удовлетворяют равенству  $s = v t$ .

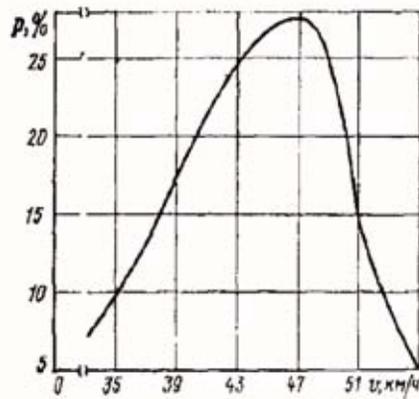


Рис. 13. Распределение ходовой скорости движения поездов на участке.

Причина заключается в том, что данное равенство справедливо для средних значений только в том случае, если для скорости берется гармоническое среднее, а для времени – среднеарифметическое, или наоборот. Здесь, как и выше, подразумевается, что поток поездов является стационарным и что скорость каждого поезда постоянна в течение интервала времени, определяющего среднюю временную скорость, или вдоль участка, определяющего среднюю пространственную скорость.

Пусть  $\lambda_v dv$  и  $n_v dv$  представляют собой соответственно дифференциалам плотности и интенсивности движения поездов, чья скорость лежит в диапазоне между  $v$  и  $v + dv$ . Тогда справедливы следующие выражения для плотностей распределения  $f_s(v)$  и  $f_t(v)$ :

$$f_s(v) dv = \lambda_v dv / \lambda ; \quad (9)$$

$$f_t(v) dv = n_v dv / n , \quad (10)$$

где  $\lambda$  и  $n$  – соответственно плотность и интенсивность потока поездов.

Из выражения (1) следует, что  $n v = v \lambda v$ .

Используя это выражение, получим из формул (4) и (5):

$$n f_t(v) = v \lambda f_s(v) . \quad (11)$$

Тогда  $\bar{v}_s = \int_0^{\infty} v f_s(v) dv = n / \lambda$ , так как  $\int_0^{\infty} f_t(v) dv = 1$ .

В результате:

$$n = \lambda \bar{v}_s . \quad (12)$$

Таким образом, уравнение (1) справедливо для средней пространственной скорости  $\bar{v}_s$ , даже если скорости поездов не одинаковы,





а являются случайными величинами с произвольным распределением вероятностей. С другой стороны, путём подстановки уравнения (12) и (11) найдём, что:

$$f_t(v) = f_s(v)v / \bar{v}_s. \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает зависимость между пространственной и временной плотностями распределения скоростей. Путём деления на  $v$  и интегрирования обеих частей уравнения (13) получим:

$$\int_0^1 \frac{1}{v} f_t(v) dv = \frac{1}{\bar{v}_s} \int_0^{\infty} f_s(v) dv = \frac{1}{\bar{v}_s}.$$

Возвращаясь затем к уравнению (8), замечаем, что  $\bar{v}_t = \bar{v}_s$ . Таким образом, средняя пространственная скорость равна средней гармонической временной скорости.

Затем рассмотрим связь между  $\bar{v}_t$  и  $\bar{v}_s$ . Подставим уравнение (13) в (4):

$$\bar{v}_t = \int_0^{\infty} v^2 f_s(v) dv / \bar{v}_s.$$

Если определить дисперсию средней пространственной скорости как:

$$\sigma_s^2 = \int_0^{\infty} (v - \bar{v}_s)^2 f_s(v) dv = \int_0^{\infty} v^2 f_s(v) dv - \bar{v}_s^2,$$

то получим:

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s \left[ 1 + (\sigma_s / \bar{v}_s)^2 \right].$$

Таким образом, для больших величин  $\sigma_s$  разница между средней пространственной и средней временной скоростями становится также большой.

## РЕЗЮМЕ

Распространённая практика изменения только одной составляющей показывает, что в динамичной и внутренне связанной сложной системе железнодорожного транспорта это приводит к изменению многих других составляющих. Результаты исследования взаимодействия скорости движения поездов с другими показателями перевозочного процесса подтвердили это утверждение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андриянов Е. А. Скорость доставки как конкурентное преимущество // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 13–14.
2. Левин Д. Ю. Системное управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте: Монография. – М.: Инфра-М, 2018. – 313 с.
3. Шарапов С. Н. Экономическая оценка повышения установленных скоростей движения грузовых поездов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 25–29.
4. Щегловитов В. Н. Теория графика движения поездов в связи с вопросом о составах. – Варшава, 1909. – 410 с.
5. Васильев И. И. К вопросу о наиболее выгоднейших соотношениях эксплуатационных и технических элементов движения поезда // Труды МИИТ. – М.: Трансжелдориздат, 1927. – Вып. V.
6. Бабичков А. М., Егорченко В. Ф. Тяга поездов. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – 356 с.
7. Орлов В. Н., Повороженко В. В. Технико-экономические расчёты по организации железнодорожных перевозок. – М.: Трансжелдориздат, 1943. – 282 с.
8. Ионниан А. И. К вопросу о выборе скорости движения товарных поездов на руководящем подъёме однопутных линий при паровой тяге // Труды МИИТ. – М.: Трансжелдориздат, 1948. – Вып. 78.
9. Гибшман А. Е. Вопросы экономики железнодорожного транспорта. Эксплуатационно-экономическое обоснование выбора параметров перспективных паровозов. – М.: Трансжелдориздат, 1948. – 154 с.
10. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
11. Пейсахзон Б. Э. Вес и скорость грузовых поездов // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1957. – Вып. 141. – 202 с.
12. Мачерет Д. А., Рышков А. В., Валеев Н. А. и др. Управление экономической эффективностью эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта с использованием инновационных подходов / Под ред. Д. А. Мачерета и А. В. Рышкова. – М.: Рнор, 2018. – 212 с.
13. Виноградов С. А., Новгородцева А. В. О влиянии скорости движения грузовых поездов на эксплуатационные показатели // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 15–18.
14. Анисимов В. А., Осьминин А. Т., Анисимов В. В. Концепция повышения допускаемых скоростей движения поездов в рамках полигонных технологий // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 19–25.
15. Железнов Д. В., Митрофанов А. Н., Митрофанова Н. В. На основе методики идентификации и прогнозирования // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 36–41.
16. Зубков В. Н., Рязанов Е. В., Чеботарева Е. А. Скорость движения поездов – индикатор качества перевозок пассажиров и грузов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 45–51. ●

### Информация об авторе:

**Левин Дмитрий Юрьевич** – доктор технических наук, главный эксперт АО «НИИАС», Москва, Россия, levindu@yandex.ru.

Статья поступил в редакцию 10.10.2019, одобрена после рецензирования 20.09.2021, принята к публикации 04.10.2021.