

Тимченко В.С., Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург

## Оценка возможности освоения прогнозируемых объемов перевозок грузов морского порта методом имитационного моделирования процессов железнодорожных перевозок

Важной проблемой, возникающей при необходимости освоения возрастающих объемов перевозок, является своевременное развитие железнодорожной инфраструктуры. Необходимость больших объемов длительно окупаемых инвестиций ставит задачу количественного обоснования достаточности предлагаемых технических и технологических решений при минимально возможных затратах.

Проблема решается на основе определения потребной пропускной способности и сравнения ее с наличной при различных вариантах реконструкции инфраструктуры и организации перевозок.

Теоретические исследования и практика доказали преимущества определения наличной пропускной способности с учетом всего множества значимых факторов методом имитационного моделирования процессов перевозок [1-5].

В статье предлагается метод комплексной оценки пропускной и провозной способностей железнодорожной линии, обслуживающей морской порт, на основе использования имитационного моделирования и «эквивалентных схем» путевого развития технических станций и предпортового железнодорожного узла.

На основе прогнозов ежегодных объемов железнодорожных перевозок по родам грузов рассчитываются потребности в подвижном составе и среднесуточное количество груженых и порожних поездов, определяющих потребную пропускную способность железнодорожного участка.

Количество физических вагонов соответствующих типов в составах, перевозящих прогнозируемые рода грузов в каждый год рассматриваемого периода, параметры составов и потребная пропускная способность определяются по формулам, представленным в табл. 1.

При оценке пропускной способности путевого развития предпортовых станций и грузовых терминалов предлагается заменять «эквивалентной схемой», которая учитывает количество и полезную длину путей, их специализацию, длительности занятия поездами всех категорий, род перегружаемого груза и максимальное количество вагонов в сутки, перерабатываемых каждым терминалом.

Задаваемые на перспективу доли поездов в сутки с  $i$ -м родом груза на  $j$ -й год, определяются по формуле:

$$\alpha_{pzij} = N_{pzij} / \sum_{i=1}^k N_{pzij}, \forall ij,$$

Где  $N_{pzij}$  – количество поездов с  $i$ -м родом груза, планируемых к перевозке за сутки  $j$ -го года;

$k$  – количество таких родов груза.

Поскольку необходимо освоить прогнозируемые объемы перевозок всех родов грузов за год, то приоритет поездов при моделировании принимается равным их доле от общего количества  $\alpha_{pzij}, \forall ij$ , что иллюстрируется гистограммой (рис. 1).

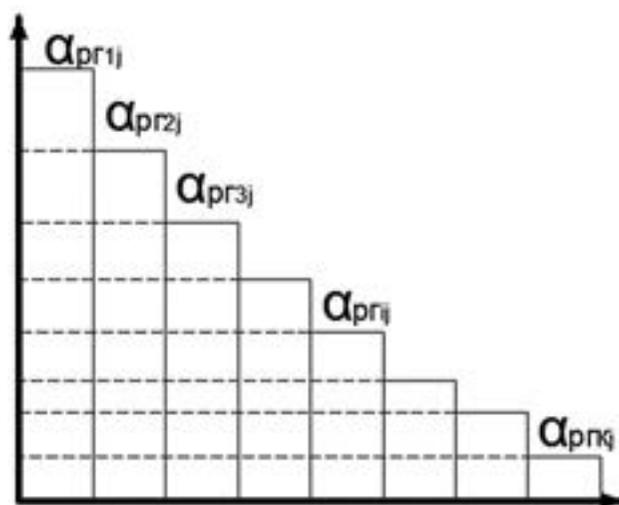


Рис.1. Диаграмма приоритетов поездов

Первоначально поезда пропускаются по участку из группы, обладающей максимальным приоритетом ( $\alpha_{pr1j}$ ). При достижении равенства оставшегося их количества с поездами из следующей группы ( $\alpha_{pr2j}$ ) поезда случайным образом выбираются из обеих групп. После достижения равенства их количеств в обеих группах с количеством поездов в следующей группе ( $\alpha_{pr3j}$ ) выбор происходит из трех групп и так далее до последнего поезда в группе с минимальным приоритетом ( $\alpha_{prkj}$ ) или до отсутствия возможности пропуска еще одного поезда из оставшихся. Такой подход обеспечивает определение наличной пропускной способности и соответствующей ей провозной способности по всем родам грузов.

Организация движения грузовых поездов по железнодорожному участку предусматривается в режиме пропуска заданного или максимального количества грузовых поездов всех категорий в сутки.

Таблица 1. Определение параметров составов и потребной пропускной способности железнодорожного участка.

№	Формулы	Обозначения	Пояснения	Ед. изм.
1	$n_{звс}^{ijk} = (\alpha_{звс}^{i1} l_{нд}^j) / l_{удв}^{i1} + \dots + (\alpha_{звс}^{ir} l_{нд}^j) / l_{удв}^{ir}$ $\forall i, j, k$	$n_{звс}^{ijk}$	Количество физических вагонов $k$ -го типа $k = 1, r$ , в составе, перевозящем $i$ -й род груза (округляется до целого числа в меньшую сторону)	
		$\alpha_{звс}^{ik}$	Доля вагонов $k$ -го типа, используемых для перевозки $i$ -го рода груза $i = 1, m$	
		$l_{нд}^j$	Полезная длина станционных путей в условных вагонах на $j$ -й год, $j = 1, n$	м.
		$l_{удв}^{ik}$	Условная длина вагона с параметрами $k$ -го типа, используемого для перевозки $i$ -го рода груза	
2	$Q_{сн}^{ij} = \sum_{k=1}^r q_{звс}^{ik} k_z^{ik} n_{звс}^{ijk}, \forall i, j, k$	$Q_{сн}^{ij}$	Масса нетто состава, перевозящего $i$ -й род груза в вагонах $k$ -го типа, за $j$ -й год	т.
		$q_{звс}^{ik}$	Грузоподъемность вагона $k$ -го типа, используемого для перевозки $i$ -го рода груза	т.
		$k_z^{ik}$	Коэффициент использования грузоподъемности вагона $k$ -го типа, используемого для перевозки $i$ -го рода груза	
3	$M_{озу}^{ij} = M_{оз}^{ij} \mu_y^{ij}, \forall i, j$	$M_{озу}^{ij}$	Планируемый объем перевозок $i$ -го рода груза на $j$ -й год, перевозимый унифицированными поездами	т.
		$M_{оз}^{ij}$	Планируемый объем перевозок $i$ -го рода груза на $j$ -й год, млн.т./год	т.
		$\mu_y^{ij}$	Доля планируемого объема перевозок $i$ -го рода груза на $j$ -й год, перевозимая унифицированными поездами	
4	$M_{озт}^{ij} = M_{оз}^{ij} (1 - \mu_y^{ij}), \forall i, j$	$M_{озт}^{ij}$	Планируемый объем перевозок $i$ -го рода груза на $j$ -й год, перевозимый тяжеловесными поездами	т.
5	$N_{зр}^{ij} = M_{озу}^{ij} / 365 Q_{сн}^{ij}, \forall ij$	$N_{зр}^{ij}$	Количество унифицированных поездов в сутки, необходимое для перевозки заданного объема $i$ -го рода груза в $j$ -й год	
6	$N_{зрт}^{ij} = M_{озт}^{ij} / 365 Q_{снт}^{ij}, \forall ij$	$N_{зрт}^{ij}$	Количество тяжеловесных поездов в сутки, необходимое для перевозки заданного объема $i$ -го рода груза в $j$ -й год	
7	$n_{нр}^{jk} = \sum_{i=1}^m n_{звсч}^{ijk} - \sum_{i=1}^m n_{звсч}^{ijk}, \forall i, j, k$	$n_{нр}^{jk}$	Количество порожних вагонов в сутки для перевозки заданного объема $i$ -го рода груза в вагонах $k$ -го типа, в $j$ -й год	
		$n_{звсч}^{ijk}$	Количество груженых вагонов $k$ -го типа для перевозки $i$ -го рода груза в $j$ -й год в нечетном направлении	
		$n_{звсч}^{ijk}$	Количество груженых вагонов $k$ -го типа для перевозки $i$ -го рода груза в $j$ -й год в четном направлении	
Направление движения порожнего вагонопотока определяется по знаку результирующего значения: «+» – порожние вагоны следуют в четном направлении, «-» – порожние вагоны следуют в нечетном направлении.				
8	$N_{нрч}^{ij} = (N_{нр}^{jk} - N_{днр}^{ij} n_{д.нр}^{ijk}) / n_{нрч}^{ijk}, \forall i, j, k$	$N_{нр}^{ij}$	Количество порожних поездов в сутки, необходимое для перевозки заданного объема $i$ -го рода груза в вагонах $k$ -го типа, в $j$ -й год	
		$N_{днр}^{ij}$	Количество длинносоставных порожних поездов в сутки, необходимое для перевозки заданного объема $i$ -го рода груза в $j$ -й год	
		$n_{днр}^{ijk}$	Количество порожних вагонов $k$ -го типа в длинносоставном поезде для перевозки $i$ -го рода груза в $j$ -й год	
		$n_{нрч}^{ijk}$	Количество порожних вагонов $k$ -го типа в поезде для перевозки $i$ -го рода груза в $j$ -й год	
9	$N_{нсч}^j = \sum_{i=1}^m (N_{зрч}^{ij} + N_{зртч}^{ij} + N_{нрч}^{ij} + N_{днрч}^{ij}), \forall i, j$	$N_{нсч}^j$	Суммарное количество поездов в сутки, обращающихся на рассматриваемом железнодорожном участке в четном направлении в $j$ -й год	
10	$N_{нсч}^j = \sum_{i=1}^m (N_{зрч}^{ij} + N_{зртч}^{ij} + N_{нрч}^{ij} + N_{днрч}^{ij}), \forall i, j$	$N_{нсч}^j$	Суммарное количество поездов в сутки, обращающихся на рассматриваемом железнодорожном участке в нечетном направлении в $j$ -й год	

В режиме пропуска заданного количества в сутки грузовые поезда отправляются с начальных станций участка по расписанию, формируемому на начало каждых модельных суток случайным образом по заданному закону распределения, с учетом перерабатывающей способности и специализации терминалов.

Различие ходовых свойств поездов обуславливается родом перевозимых грузов (тип подвижного состава, количество вагонов в составе, масса), а также тяговыми характеристиками локомотивов.

В процессе имитационного моделирования грузовой «поезд-скоростной» может быть пропущен по всему участку в интервале между поездами, следующими по расписанию или ранее пропущенными. Это событие фиксируется на карте состояний моделируемого участка.

«Поезд-тихоход» в этом интервале вызвал бы движение на желтый огонь светофора идущего за ним поезда. Поэтому медленно идущий грузовой поезд в такой ситуации не пропускается. Интервал между этими поездами не используется, а грузовой поезд ставится на обгон на предыдущей станции и через заданные интервалы времени повторяются попытки пропустить его в следующий интервал. При этом длительность стоянки поезда в ожидании пропуска ограничивается настройками модели и в случае превышения времени стоянки попытки пропустить поезд прекращаются.

В следующий момент времени отправления делается попытка пропустить очередной случайно выбранный поезд. Пропуск его начинается только после пропуска предыдущего поезда, но не ранее намеченного времени отправления.

Модель процесса предусматривает возможность ввода требования пропускать не пропущенные поезда в следующие сутки.

В режиме пропуска максимального количества грузовых поездов в сутки моменты времени появления грузовых поездов на входе системы первоначально не задаются, а их приоритет определяется, как и в предыдущем режиме. Поезд пропускается по железнодорожной линии в ближайший момент модельного времени и реализует очередь типа *FIFO* – «первый вошел – первый вышел».

Возможности пропуска каждого поезда проверяются с начала суток, что обеспечивает использование каждого достаточного для пропуска поезда интервала времени подходящим по параметрам поездом.

В результате количество грузовых поездов, которое удастся пропустить за сутки в обоих режимах, становится случайной величиной, поскольку зависит от очередности пропуска поездов с различными ходовыми свойствами.

Зависимость количества поездов, пропущенных по двухпутному участку в каждые из 100 суток, от случайно выбранной их последовательности (рис. 2), показывает значительный диапазон изменения.

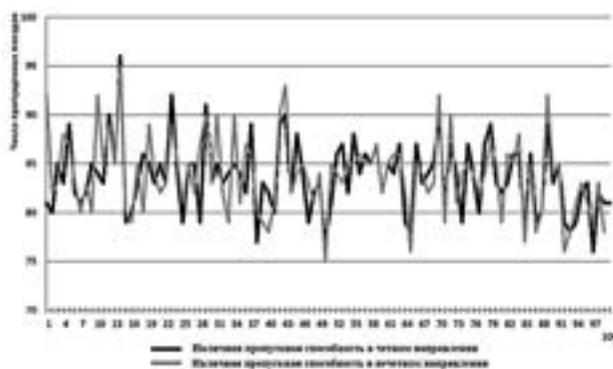


Рис.2. Зависимость количества грузовых поездов, пропущенных за сутки, от их очередности.

Поезд пропускается при свободности элементов маршрута, проверяемой в течение суток с шагом в тридцать секунд с помощью карты состояний, которая содержит информацию о длительностях занятия всех элементов. Если возможен выбор элементов маршрута (приемо-отправочные пути, изолированные секции), то выбирается кратчайший.

Моделирование условий пропуска поездов (рис. 3) иллюстрируют фрагменты графика движения и карты состояний участка, оборудованного трехзначной автоблокировкой с защитными участками и локомотивной сигнализацией.

Длительности горения на локомотивном светофоре красного огня обозначены на карте состояний черным цветом, красного с желтым – наполовину штриховкой и черным, желтого огня – штриховкой, а зеленого огня – отсутствием этих обозначений.

В соответствии с правилами тяговых расчетов линия хода поезда на графике движения (нитка графика) строится для центра тяжести поезда. Красный огонь на проходном светофоре горит с момента вступления головы поезда на ограждаемый этим светофором блок-участок (б/у) до момента освобождения хвостом поезда защитного участка, расположенного за следующим проходным светофором. В этот момент красный огонь на светофоре меняется на желтый, а при освобождении хвостом поезда следующего (б/у) – на зеленый. Поэтому для построения карты состояний нитки графика дополняются линиями хода головы и хвоста каждого поезда. Эти линии соответствуют длительностям проследования поездом расстояний, равных половине его длины, определяемых тяговым расчетом.

На карте состояний отображаются изменения показаний локомотивного светофора на локомотиве поезда, движущегося за впереди идущим поездом, в зависимости от его сближения с впереди идущим. Движение головы поезда по блок-участкам соответствует перемещению по карте состояний левой грани прямоугольников черного цвета. Так, поезд 2012 сна-

чала занимает (б/у) 16, затем одновременно 16 и 14, только 14, 14 и 12 и т.д.

При освобождении хвостом поезда 2012 (б/у) 16 навстречу идущему за ним поезду 64 в рельсовую цепь начинает поступать код красно-желтого огня, и, в случае вступления поезда 64 на этот б/у, на локомотивном светофоре загорелся бы красно-желтый огонь. При вступлении поезда 64 на предыдущий б/у (18) на его локомотивном светофоре загорелся бы желтый огонь, и при вступлении на б/у (20) – зеленый.

Карта состояния показывает, что при занятии поездом 64 б/у 10 на локомотивном светофоре загорелся бы желтый огонь, что означает недопустимое сближение с поездом 2012, одновременно занимающим блок-участки 6 и 4, и потребовалось бы снижения скорости поезда 64 (штриховая линия на графике). Поэтому поезд 2012 в этом интервале не пропускается (штриховая линия) и обгоняется поездом 64.

На б/у 10 (см. рис.3) поезд-скоростной 2014 нагоняет поезд-тихоход 2012 и поэтому два б/у следует на желтые огни светофоров со скоростью не более 60 км/ч. До занятия поездами 2014 б/у 6 поезд 2012 успевает остановиться на боковом пути станции А для обгона. Готовится маршрут, и открываются входной и выходной светофоры на станции А для безостановочного пропуска поезда 2014. На впереди расположенном проходном светофоре 6 этому поезду загорается зеленый огонь, поэтому далее он следует с установленной скоростью.

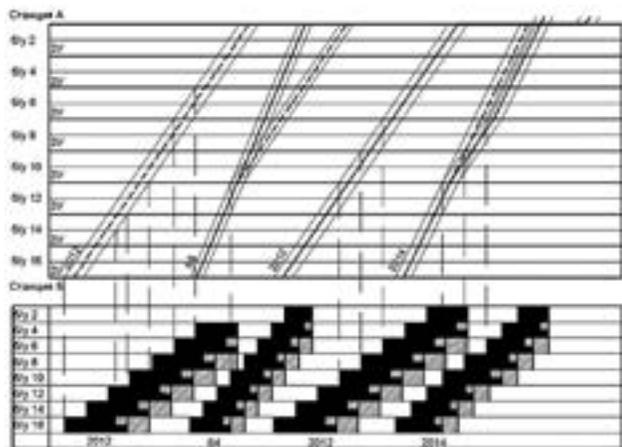


Рис.3. Отображение пропуска поездов на графике движения и карте состояний.

При необходимости первоочередного пропуска поезда 2014, например, по причине малого оставшегося времени работы локомотивной бригады, поезд 2012 потребует обогнать на станции Б.

Моделирование учитывает, что при выполнении ремонтных работ поезд задерживается на начальной станции, а при наличии свободного пути останавливается на промежуточной станции до окончания «окна». При этом учитывается необходимость сокращенного

опробования тормозов, в случае стоянки поезда более установленного времени.

Для линий с высоким значением коэффициента использования пропускной способности в имитационной модели предусмотрена возможность использования безобгонного движения поездов.

После моделирования пропуска поездов за статистически достаточное количество суток определяется закон распределения пропускной способности, математическое ожидание и дисперсия которого позволяют оценить с заданной доверительной вероятностью статистически обоснованную наличную пропускную способность железнодорожной линии и риск ее не достижения.

Наличная пропускная и провозная способности сравниваются с потребными, и делается вывод о возможности освоения заданных объемов перевозок при рассматриваемом варианте развития инфраструктуры и организации движения с учетом ежегодного предоставления «окон». Потребность в «окнах» определяется программным блоком «Окна», учитывающим пропущенный тоннаж по ремонтируемому участку на длительную перспективу [5].

Рассчитываются суммарное время задержек поездов предоставлением «окон», а также количество поездов, которые должны быть отклонены на параллельные железнодорожные линии. Определяются участковые, технические и маршрутные скорости поездов разных категорий, массы перевезенных грузов, провозная способность и другие показатели процессов перевозок.

#### Литература

1. Кокурин И.М., Миняев С.Е. Оценка технико-экономической эффективности вариантов реконструкции железнодорожной сети на основе имитационного моделирования // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2004. – №6. – С. 20 – 26.
2. Кокурин И.М., Кудрявцев В.А. Оценка пропускной способности железнодорожных линий на основе имитационного моделирования процессов перевозок // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 2 С. 18-22.
3. Кокурин И.М., Тимченко В.С. Методы определения «узких мест», ограничивающих пропускную способность железнодорожных направлений // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Выпуск 1 (34). – С. 15 – 22.
4. Кокурин И.М., Тимченко В.С. Методология улучшения железнодорожного транспортного обслуживания морских торговых портов // Международная научно-практическая конференция Транспорт России: проблемы и перспективы – 2012 – СПб: ИПТ РАН, 2012. С. 31 – 35.

5. Кокурин И.М., Тимченко В.С. Оценка методом имитационного моделирования возможности освоения прогнозируемых объемов перевозок грузов по железнодорожной линии, обслуживающей морской порт // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – №6. – С. 39-44
6. Тимченко В.С. Оценка перспективной пропускной способности участков железнодорожной сети с учетом предоставления «окон», на основе применения имитационного моделирования процессов перевозок // Молодой ученый. — 2014. — №2. — С. 199-204.



**Рахмангулов А.Н., Осинцев Н.А.,** ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск  
**Юань Т.,** Харбинский политехнический университет, г. Харбин (КНР)

## **Комплексный подход к созданию интеллектуальных транспортных систем на промышленных предприятиях\***

### **Введение**

В настоящее время одним из основных факторов, ограничивающих повышение качества перевозок в условиях роста сложности структуры грузопотоков, является недостаточный уровень согласованности взаимодействия магистральных видов транспорта и транспорта необщего пользования на участках непосредственного транспортного обслуживания производства и в транспортных узлах. Например, средние годовые потери промышленного железнодорожного транспорта металлургического предприятия, включающего в себя несколько десятков промышленных станций и перерабатывающего 2-3 тыс. вагонов в сутки, составляют 70-80 млн руб. или более 20% от общих затрат, связанных с простоем вагонов [1], а суммарные потери, возникающие в результате несогласованного взаимодействия магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, достигают до 1,5 млрд руб. в год.

Основные причины возникновения таких потерь связаны с [2]:

- рассогласованием графиков подвода вагонов и грузов на предприятие и фактической потребности в них;
- нерациональным выбором маршрута движения вагонопотоков на путях необщего пользования;
- неоптимальным использованием порожних вагонов на предприятии;
- недостаточным взаимодействием в оперативном режиме железнодорожных станций по пропуску и переработке вагонопотоков.

В таких условиях требуется совершенствование существующей методологии организации взаимодействия производства и транспорта, обеспечивающих непосредственное транспортное обслуживание грузовладельцев. Такая методология должна основываться не только на современных достижениях в технологии и организации железнодорожных перевозок, но и учитывать экономические и информационные факторы и ограничения, возникающие в процессе взаимодействия промышленного и магистрального железнодорожного транспорта.

### **Логистическое представление системы управления транспортом промышленных предприятий**

Эффективной формой организации взаимодействия магистрального и промышленного железнодорожного транспорта являются транспортно-технологические системы (ТТС), основанные на системной реализации разноуровневых функций управления перевозочным процессом, включающих в себя [5]: техническую эксплуатацию транспортных средств и устройств; регулирование технологических процессов на уровне отдельных грузовых фронтов, промышленных железнодорожных станций и маневровых районов; организацию вагонопотоков на путях необщего пользования; взаимодействие с магистральным транспортом на полигоне примыкания; развитие инфраструктуры ТТС на региональном и национальном уровнях. Выделение уровней ТТС основано на группи-

\* Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), грант № 15-37-51307