**Предельные возможности метрополитена как транспортной системы**

В. А. Мнацаканов, к. т. н.

По статистике средняя дальность поездки пассажира на Московском метрополитене составляет сегодня около 10,8 км. На метрополитенах с менее развитой сетью линий она еще меньше: на метрополитене С.-Петербурга средняя дальность поездки пассажира — 9,7 км, на Бакинском метрополитене — 8,4 км, а на Ташкентском метрополитене — 6 км.

На Московском метрополитене скорость сообщения (средняя скорость движения с учетом времени остановки) метропоездов между станциями, расположенными под землей, составляет 41,3 км/ч, на метрополитене С. Петербурга — 39 км/ч, а на Ташкентском метрополитене — 39,4 км/ч. Самая высокая скорость сообщения метропоездов сегодня — на Минском метрополитене — 41,4 км/ч.

Как известно, за время поездки среднестатистический пассажир проводит в сооружениях метрополитена от 25 до 40 мин. Из них примерно половину времени он находится непосредственно в подвижном составе. А остальное время затрачивает на подход к подвижному составу, включая спуски «под землю» на эскалаторах, на ожидания прибытия метропоездов, на посадку и высадку из вагонов, на пересадки, на подъем на поверхность земли и выход в город.

Провозная способность электроподвижного состава (основного транспорта метро) значительно превышает провозную способность эскалаторов — вспомогательного (встроенного) транспорта метро. Поэтому возле входа на эскалаторы в часы «пик» часто возникают «пузыри». Это — своеобразные «пробки», это «узкие места» любого, даже самого современного, метрополитена. Они затрудняют посадку на эскалаторы и заметно увеличивают время, затрачиваемое пассажирами на спуск к вагонам и подъем в город из глубины подземных станций. В это время у пассажира особенно остро проявляется и нарастает транспортная усталость от поездки. Как в «пробках» перегреваются машины, так люди (особенно с вещами) переутомляются в «пузырях».

Хронометраж перемещений пассажира в помещениях метрополитена показывает, что в часы «пик» при поездках по одной линии на спуски и подъемы на эскалаторах, на подходы к ним и на перемещения по вестибюлям станций пассажир затрачивает от 8 до 10 мин. При поездке по одной линии на расстояние 10,8 км пассажир проводит в помещениях метрополитена около 24 мин. Из них 15 мин он едет в вагоне со скоростью сообщения 41—42 км/ч, а 9 мин затрачивает на подход к подвижному составу и на выход в город после завершения поездки. Скорость передвижения пассажира по городу при этом составляет:

10 800 м / 1440 сек = 7,5 м/с = 27 км/ч.

При поездке с пересадкой (поездка средней дальности 10,8 км, как правило, включает одну пересадку) пассажир дополнительно проводит в помещениях метрополитена около 8 мин. В общей сложности на среднестатистическую поездку с одной пересадкой на расстояние 10,8 км пассажир метрополитена затрачивает:

9 мин + 15 мин + 8 мин = 32 мин (1920 сек).

Скорость поездки по городу на метро с одной пересадкой составляет:

10 800 м / 1920 сек = 5,625 м/с = 20 км/ч.

При поездке с 2-мя пересадками скорость передвижения пассажира по городу на метро снижается до 16 км/ч и становится такой же, как на трамвае.

Таким образом, сегодня метрополитен, в зависимости от числа пересадок, обеспечивает среднестатистическому пассажиру передвижение по городу со скоростью 16—27 км/ч (в среднем — 22 км/ч).

Предельная скорость сообщения между подземными станциями, которую смогут в будущем обеспечивать технически более совершенные, чем сегодня, вагоны метрополитена, не превысит 50 км/ч /1/. Она ограничена условиями сцепления колес с рельсами, предельно допустимыми для пассажира ускорениями и замедлениями вагонов, мощностью систем энергоснабжения, мощностью тягового электропривода, условиями стабильности и безопасности движения метропоездов и пр. Под стабильностью движения здесь понимается возможность для метропоездов устойчиво реализовывать заложенную в график движения скорость сообщения даже при случайных задержках на станциях.

В случае задержки на станции метропоезд должен обеспечить нагон упущенного времени непосредственно на следующем перегоне. Если ему не удастся этого сделать, то на следующей станции его будет ожидать большее, чем обычно, количество пассажиров и вероятность очередной задержки на станции возрастет… Следствием этого может стать сбой графика движения.

Внеплановые задержки метропоездов на станциях в часы «пик» происходят регулярно и составляют от 5 до 10 с. Для возможности «вписывания» в график режим движения метропоезда должен быть таким, чтобы после задержки он мог проехать по перегону на 5—10 с быстрее, чем по расписанию, и скомпенсировать задержку. Если этого «запаса хода» в расписании нет, то стабильная работа метропоездов на линии не может быть гарантирована. Необходимость иметь 10-секундный запас времени хода на нагон случайных опозданий в наибольшей степени ограничивает возможность построения графика движения метропоездов со скоростями сообщения более 50 км/ч.

При скорости перемещения пассажира «под землей» — 50 км/ч скорость его передвижения по городу составит:

|  |  |
| --- | --- |
| при поездках дальностью 10,8 км без пересадки | — 29 км/ч |
| при поездках дальностью 10,8 км с одной пересадкой | — 21,5 км/ч |
| при поездках дальностью 10,8 км с двумя пересадками | — 17 км/ч |

Эти цифры показывают, что скорость, с которой пассажир метрополитена сможет передвигаться по городу в недалеком будущем, составит (в среднем) около 25 км/ч. Поскольку сегодня средняя скорость передвижения по городу на метро составляет 22 км/ч, то можно сказать, что сегодняшний метрополитен реализует свои предельные (с точки зрения скорости передвижения пассажира по городу) возможности на 90%. Это очень высокий показатель. И он был достигнут уже в прошлом веке.

Провозная способность метрополитена ограничена пропускной способностью его подземных станций. Пропускная способность станций тесно связана со скоростью сообщения. При росте скоростей сообщения возрастают скорости движения метропоездов по перегонам. Как следствие, возрастают скорости начала торможения метропоездов, а значит и тормозные пути. Поэтому с целью обеспечения безопасности движения увеличивают расстояние между идущими друг за другом метропоездами. Здесь полная аналогия с автодорогой: чем больше скорость движения автомобилей, тем большими должны быть безопасные расстояния между ними.

Повышение скорости движения не способно скомпенсировать увеличение расстояний между метропоездами с точки зрения частоты следования метропоездов. В результате при росте скоростей движения частота следования метропоездов уменьшается, пропускная способность станций и провозная способность линий метрополитена сокращаются. Во многом и по этой причине, стремиться повышать скорость сообщения метропоездов между подземными станциями сверх 48—50 км/ч практически нецелесообразно.

Провозная способность линий метрополитена определяется пропускной способностью станций и наполнением вагонов следующих друг за другом метропоездов. На Рис. 1 представлен график нагрузки одного из вагонов семивагонного метропоезда при его работе в течение суток на самом напряженном маршруте наиболее загруженной линии Московского метрополитена.

Рис. 1. Заполнение вагона метро пассажирами во время его работы на линии.

Нами установлено, что наполнение вагонов метропоезда во время работы на линии подчиняется статистическому закону распределения Реллея:

,

где Апс — количество пассажиров в вагоне метрополитена.

Эмпирическая гистограмма и выравнивающая ее теоретическая кривая с параметрами М=89, σ=46,5, σ0=71 представлены на Рис. 2.

Рис. 2. Эмпирическая гистограмма и кривая распределения числа пассажиров в вагоне метро Апс.

Анализ графика Рис. 2 с помощью методов теории вероятностей позволяет установить, что нагрузка 130 пассажиров на вагон включает около 90% всех случаев загрузки вагона в эксплуатации. Иначе говоря, если 100 раз за сутки подсчитать количество пассажиров в случайно выбранном вагоне метрополитена, то в 90 случаях из 100 оно не превысит 130 человек.

Методически правильно обработать большой массив статистических данных по наполнению вагонов метрополитена в эксплуатации и сделать из результатов обработки верные выводы нам помогла докт. физ.-мат. наук, проф. Вентцель Е. С.

Пропускная способность станции измеряется количеством метропоездов, проследовавших через нее в течение одного часа, и определяется минимально возможным интервалом между идущими друг за другом метропоездами (1):

,

где П — пропускная способность станции, поездов/час;

3600 — количество секунд в часе;

Тмин — минимальный интервал между метропоездами, с.

Минимальный интервал между проходящими через станцию метропоездами определяется временем занятия метропоездом зоны станции и технологическим запасом, необходимым для обеспечения безопасности движения метропоездов (2):

Тмин = tэв + tс + tт + tзап

где tэв — время эвакуации метропоезда со станции, с;

tс — время стоянки метропоезда на станции, с;

tт — время торможения метропоезда в зоне станции, с;

tзап — технологический запас времени (складывается из времени подхода метропоезда к станции, времени его выбега в зоне станции, запаса на технологическую погрешность приемных и путевых устройств автоматического регулирования скорости и автоматической локомотивной сигнализации АРС-АЛС и пр.), tзап ~15 с.

Время стоянки и время запаса практически стабильны. Поэтому минимальный интервал между метропоездами определяется, в основном, временами торможения и эвакуации.

Время эвакуации — это время от начала движения метропоезда до его полного ухода за пределы станции (до прохождения им в процессе разгона пути длинной около 200 м). Поскольку разгон метропоезда происходит с переменным ускорением, время эвакуации определяется по формуле (3):

,

где Sу — путь разгона до момента ухода со станции, м, S у ~200 м;

а ср — среднее ускорение за период разгона метропоезда, м/с2.

Время стоянки метропоезда на станции (tс) регламентировано. В среднем оно составляет 25 с.

Время торможения прямо пропорционально скорости начала торможения и обратно пропорционально среднему за период торможения замедлению (4):

,

где Vнт — скорость начала торможения метропоезда перед остановкой, м/с;

bср —среднее замедление за время торможения, м/с2.

На вагонах метрополитена основным видом торможения является электрическое торможение. Для повышения его эффективности мощность тяговых машин в режиме торможения по отношению к режиму пуска увеличивают практически в два раза. Это решение оказалось на практике столь эффективным, что его применяют практически на всех отечественных и зарубежных вагонах метрополитена. Тяговые расчеты и испытания метропоездов показывают, что за счет двойного форсирования мощности при торможении среднее замедление в диапазоне скоростей 0—70 км/ч превышает среднее ускорение в этом же диапазоне скоростей в 1,25 раза. То есть, с высокой степенью точности можно считать, что (5)

bср = 1,25 аср.

При скоростях сообщения 43—48 км/ч скорости начала торможения метропоездов составляют около 70 км/ч (Vнт ~20 м/с).

Подставив (2, 3, 4, 5) в (1), получим (6):

Уравнение (6) представляет собой зависимость между пропускной способностью станции метрополитена и ускорением (замедлением), с которым метропоезд разгоняется (тормозит) в станционной зоне. Чем большие ускорения (замедления) реализует метропоезд во время разгонов (торможений), тем меньше времени он «занимает» станцию и тем большей пропускной способностью отвечают ему станции, встречающиеся на его пути.

В Таблице 1 и на Рис. 3 представлена зависимость пропускной способности станции от ускорения (замедления) метропоезда.

Таблица 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| а(b), м/с2 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| П, поезд./час | 21,9 | 32,3 | 39 | 43,8 | 47,3 | 50,5 | 52,9 | 54,8 | 56,5 |

Рис. 3. Зависимость пропускной способности станции от ускорения (замедления) метропоезда.

В представленной зависимости присутствует эффект «насыщения»: при увеличении ускорения от 0,2 м/с2 до 1,2 м/с2 пропускная способность растет почти пропорционально росту ускорений (замедлений), а при дальнейшем росте ускорений (замедлений) темп роста пропускной способности заметно сокращается.

Для эксплуатируемых сегодня метропоездов характерны следующие средние ускорения при разгоне до скоростей 60—70 км/ч и средние замедления в диапазоне скоростей 70—0 км/ч (Таблица 2).

Таблица 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Модель вагона | Среднее ускорение, м/с2 | Среднее замедление, м/с2 |
| мод. 81.717/714 | 0,98 | 1,28 |
| мод. 81.720/721 (Яуза) | 0,79 | 1,11 |

Подставив в формулу (6) значения ускорений (замедлений) из Таблицы 2, получим, что пропускная способность станций метрополитена составляет:

для метропоездов из вагонов мод. 81.717/714 - 47 поездов/час

для метропоездов из вагонов мод. 81.720/721 (Яуза) — 43 поезда/час.

На Московском метрополитене метропоезда эксплуатируют сегодня с частотой движения 40 поездов/час и скоростью сообщения 41 км/ч. Но технические характеристики вагонов позволяют эксплуатировать их с частотой движения — 47 поездов/час и скоростью сообщения около 48 км/ч.

На каждой радиальной линии Московского метрополитена имеются 5—6 наиболее загруженных в часы «пик» перегонов. Составы, следующие друг за другом, проезжают эти перегоны за 15—20 минут. В это время их вагоны наиболее загружены. В районе этих перегонов на практике достигаются реальные пределы провозной способности метрополитена как транспортной системы.

Обследование пассажиропотоков на этих наиболее загруженных участках линий показало, что в часы «пик» средняя за час нагрузка вагонов, проезжающих в течение часа по этим 5—6 наиболее загруженным перегонам, составляет около 200 пассажиров на вагон (средняя за 15 мин загрузка вагонов составляет около 270 пасс./вагон). При работе на линии семивагонных составов, следующих с частотой 47 поездов в час, часовая провозная способность линии метрополитена составит:

П = 200 × 7 × 47 = 66 тыс. пасс./ час

Пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии составит:

П15= 270 ×; 7 × 47 = 89 тыс. пасс./час

При эксплуатации на линии метропоездов, составленных из вагонов с «идеальными» тяговыми и тормозными характеристиками («идеальных» вагонов пока еще нет, но технически их сегодня уже можно построить), пропускная способность станций метрополитена достигнет 52 поезда/час в одном направлении. При этом провозная способность линии при эксплуатации на ней 7-ми вагонных метропоездов длиной 135м составит около 73 тыс. пасс./час в одном направлении, а при эксплуатации 8-ми вагонных метропоездов длиной до 160м — около 83 тыс. пасс./час в одном направлении. Пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии составит:

П15 = 270 × 8 × 52 = 112 тыс. пасс./час

**Выводы**

1. Средняя скорость поездки по городу на метро составляет сегодня около 22 км/ч. В будущем она может возрасти до 25 км/ч. Это предел.

2. Провозная способность линий метрополитена при эксплуатации на них 8-ми вагонных метропоездов составляет сегодня — 75 тыс. пасс./час. в одном направлении. В будущем она может возрасти до 83 тыс. пасс./час в одном направлении. Это предел.

3. С точки зрения провозной способности и скорости поездки пассажира по городу метрополитен сегодня реализует свои предельные возможности на 90%.

4. Предельные показатели метрополитена как транспортной системы:

скорость передвижения пассажира по городу — 25 км/ч;

провозная способность линии при эксплуатации на ней метропоездов длиной до 160 м — 83 тыс. пасс./час в одном направлении;

пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии метрополитена — 112 тыс. пасс./час в одном направлении.

5. Метрополитен, как общественный транспорт, предназначенный для массовых перевозок пассажиров, по провозной способности удовлетворяет требованиям крупного города XXI века.

По скорости поездки метрополитен не удовлетворяет требованиям жителя крупного города XXI века.

**Список литературы**

1. Гаврилов Я. И., Мнацаканов В. А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М. , Транспорт, 1986, 230с.