

**Предельные возможности метрополитена
по провозной способности и скорости поездки пассажира.
(журнал «Метро и тоннели» №3, 2002г.)**

По статистике средняя дальность поездки пассажира на Московском метрополитене составляет 10,8 км. Для сравнения: средняя дальность поездки на метрополитене С.-Петербурга – 9,7км, на Бакинском метрополитене – 8,4км, а на Ташкентском метрополитене – 6км.

Скорость сообщения метropоездов между станциями, расположенными под землей, на Московском метрополитене – 41,3км/ч, на метрополитене С.Петербурга – 39км/ч, а на Ташкентском метрополитене – 39,4км/ч. Самая высокая скорость сообщения метropоездов сегодня на Минском метрополитене – 41,4км/ч.

Тягово-энергетические испытания метropоездов проводят при максимальной скорости сообщения, которую способны развивать вагоны, входящие в состав испытываемого метropоезда. Во время испытаний было установлено, что вагоны метрополитена мод. 81.717/714, мод. 81.718/719 и мод. 81.720/721 при движении по перегону длиной 1700м (средняя длина перегона на Московском метрополитене) с 25с остановкой способны устойчиво реализовывать максимальную скорость сообщения 48 км/ч, имея при этом 10-ти секундный запас времени хода на нагон случайных опозданий.

За время поездки на расстояние средней дальности со скоростью сообщения около 42 км/ч 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 на эскалаторах «под землю», на ожидания прибытия поездов, 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 (дополнительного транспорта метро). Поэтому возле входа на эскалаторы в часы «пик» возникают «пузыри». Это – своеобразные «пробки». Это «узкое место» любого, даже самого современного, метрополитена. Они затрудняют посадку на эскалаторы и заметно увеличивают время, затрачиваемое пассажирами на спуск к вагонам и подъем в город с глубины подземных станций. В это время у пассажира особенно остро проявляется транспортная усталость от поездки. Как в «пробках» перегреваются машины, так люди 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 в часы «пик» по одной линии без пересадки на расстояние 10,8 км пассажир проводит в помещениях метрополитена около 24 мин. Из них

15 мин он едет в вагоне со скоростью сообщения 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:

$$10800\text{м} / 1440\text{сек.} = 7,5 \text{ м/с} = 27 \text{ км/ч.}$$

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:

$$9\text{мин} + 15\text{мин} + 8\text{мин} = 32 \text{ мин} (1920\text{сек}).$$

Скорость поездки по городу с одной пересадкой составляет:

$$10800\text{м} / 1920 \text{ сек.} = 5,625 \text{ м/с} = 20 \text{ км/ч.}$$

При поездке с 2-мя пересадками скорость передвижения пассажира по городу снижается до 16 км/ч.

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

Максимальная скорость сообщения между подземными станциями, которую в недалеком будущем смогут развивать технически более совершенные вагоны метрополитена, не превысит 50 км/ч /1/. Она ограничена условиями сцепления колес с рельсами, условиями комфортабельности поездки (предельно допустимыми для пассажира ускорениями и замедлениями вагонов), мощностью систем энергоснабжения, мощностью тягового электропривода, условиями стабильности и безопасности движения и пр. Под стабильностью движения здесь понимается возможность для метropоездов устойчиво реализовывать заложенную в график движения скорость сообщения даже при длительных задержках пассажирами на станциях. В случае задержки на станции метropоезд должен обеспечить нагон упущенного времени. Если ему не удастся это сделать, то на следующей станции его будет ожидать большее, чем обычно, количество пассажиров и вероятность повторной задержки на станции возрастет.

Внеплановые задержки метropоездов на станциях в часы «пик» происходят регулярно и составляют от 5 до 10 с. Для «вписывания» в график после очередной задержки режим движения метropоезда должен быть таким, чтобы он мог проследовать перегон на 5-10с быстрее, чем по расписанию, и скомпенсировать задержку. Если этого запаса нет, то стабильность работы метropоезда на линии не может быть гарантирована: возможен сбой графика движения. Необходимость иметь 10-ти секундный запас времени хода на нагон случайных опозданий в наибольшей степени ограничивает возможность построения графика движения метropоездов со скоростями сообщения более 50 км/ч. При скоростях сообщения более 50 км/ч такого запаса просто не будет.

При средней 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.

Отсюда следует, что скорость, с которой пассажир метрополитена сможет передвигаться по городу в недалеком будущем, составит (в среднем) около 25 км/ч. Поскольку в настоящее время средняя скорость передвижения по городу на метро составляет 22 км/ч, то можно сказать, что метрополитен сегодня реализует свои предельные (с точки зрения скорости передвижения пассажира) возможности на 90%. Это очень высокий показатель.

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

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

Провозная способность линий метрополитена определяется пропускной способностью станций и наполнением вагонов следующих друг за другом метropоездов. На Рис.1 представлен график «мгновенной» загрузки вагона метropоезда в течение суток на наиболее загруженной линии Московского метрополитена, а на Рис.2 - график среднечасовой загрузки этого вагона.

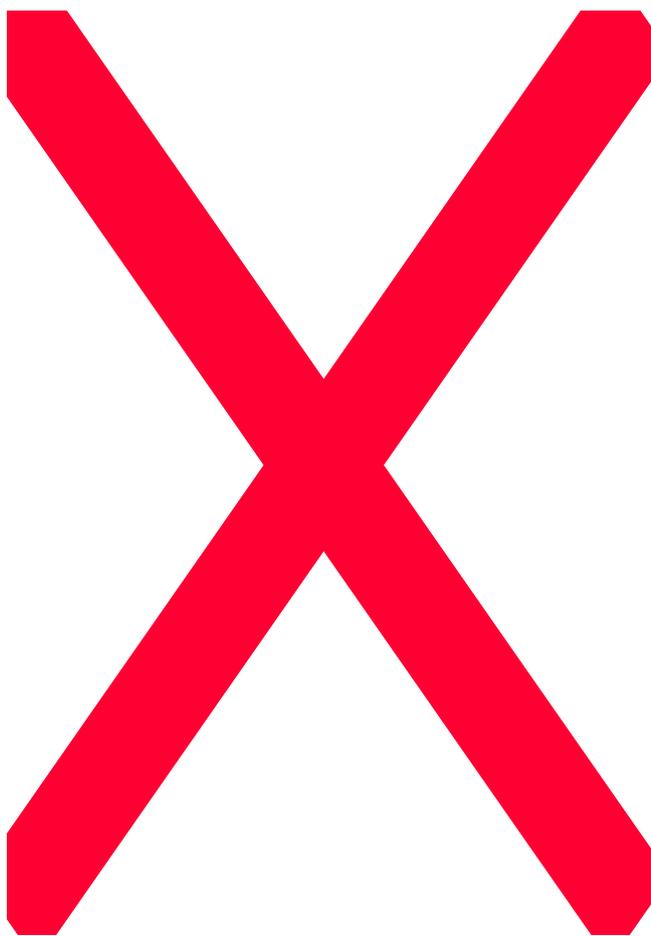


Рис.1 Загрузка вагона метрополитена в эксплуатации.

Рис.2 Среднее за час наполнение вагона в течение суток.

Нами установлено, что наполнение вагонов метропоезда при работе на линии подчиняется закону распределения Реллея:

$$f(A_{\text{пс}}) = 2 \times 10^{-4} \times A_{\text{пс}} \times e^{-\left(10^{-4} \times A_{\text{пс}}^2\right)},$$

где $A_{\text{пс}}$ - количество пассажиров в вагоне метрополитена.

Эмпирическая гистограмма и выравнивающая ее теоретическая кривая с параметрами $M=89$, $\sigma = 46,5$, $\sigma_0 = 71$ представлены на Рис.3.

Функция распределения величины A_{nc}

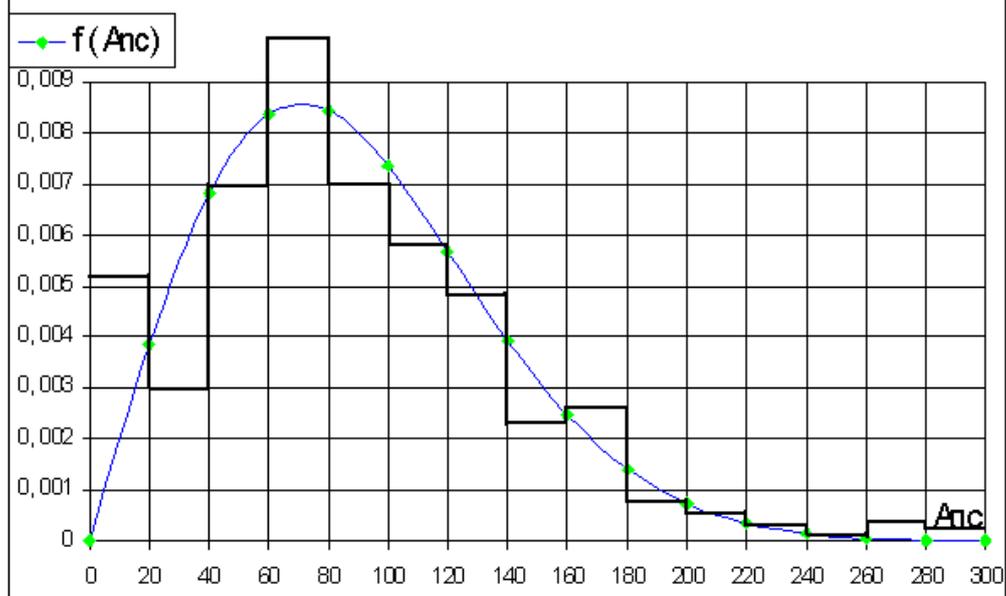


Рис.3 Эмпирическая гистограмма распределения величины $A_{пс}$ (числа пассажиров в вагоне метрополитена) и выравнивающая ее теоретическая кривая.

Как видно из графика, нагрузка 130 пассажиров на вагон включает около 90% всех случаев загрузки вагона в эксплуатации. Иначе говоря, если 100 раз за сутки случайным образом подсчитать количество пассажиров в случайно выбранном вагоне метрополитена, то в 90 случаях из 100 оно не превысит 130 человек (9 тонн).

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

Пропускная способность станции измеряется количеством метropоездов, проследовавших через нее в течение одного часа, и определяется минимально возможным интервалом следования:

$$П = \frac{3600}{T_{\text{мин}}}, \quad (1)$$

где $П$ – пропускная способность станции, поездов/час;

3600 – количество секунд в часе;

$T_{\text{мин}}$ – минимальный интервал между метropоездами, с.

Минимальный интервал между следующими через станцию метropоездами определяется временем занятия метropоездом зоны станции и технологическим запасом, необходимым для обеспечения безопасности движения поездов:

$$T_{\text{мин}} = t_{\text{эв}} + t_{\text{с}} + t_{\text{т}} + t_{\text{зап}} \quad (2)$$

где $t_{\text{эв}}$ – время эвакуации метropоезда со станции, с;

$t_{\text{с}}$ – время стоянки метropоезда на станции, $t_{\text{с}} = 25\text{с}$;

$t_{\text{т}}$ – время торможения метropоезда в зоне станции, с;

$t_{\text{зап}}$ – технологический запас времени (складывается из времени подхода метropоезда 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.), $t_{\text{зап}} \approx 15\text{с}$.

Время стоянки метropоезда на станции и время запаса практически стабильны. Поэтому минимальный интервал между метropоездами определяется, в основном, временами торможения и эвакуации.

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

$$t_{эв} = \sqrt{\frac{2 S_y}{a_{cp}}} \quad (3)$$

где S_y – путь разгона до момента ухода со станции, м, $S_y \approx 200\text{м}$;
 a_{cp} - среднее ускорение за период разгона метropоезда, м/с^2 .

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

$$t_r = \frac{V_{нт}}{b_{cp}}, \quad (4)$$

где $V_{нт}$ - скорость начала торможения метropоезда перед остановкой, м/с ;
 b_{cp} - среднее замедление за время торможения, м/с^2 .

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 метropоездов 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

$$b_{cp} = 1,25 a_{cp}. \quad (5)$$

При скоростях сообщения 43-48 км/ч скорости начала торможения метropоездов составляют около 70 км/ч ($V_{нт} \approx 20\text{м/с}$).

Подставив (2,3,4,5) в (1), получим:

$$\Pi = \frac{180}{\frac{1}{\sqrt{a_{cp}}} + \frac{0,8}{a_{cp}}} + 2 \quad (6)$$

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, тем меньше времени он «занимает» станцию и тем большей пропускной способностью отвечают ему станции, встречающиеся на его пути.

В Таблице 1 и на Рис. 4 представлена зависимость пропускной способности станции от ускорения (замедления) метропоезда.

Таблица 1

$a(b)$, м/с ²	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

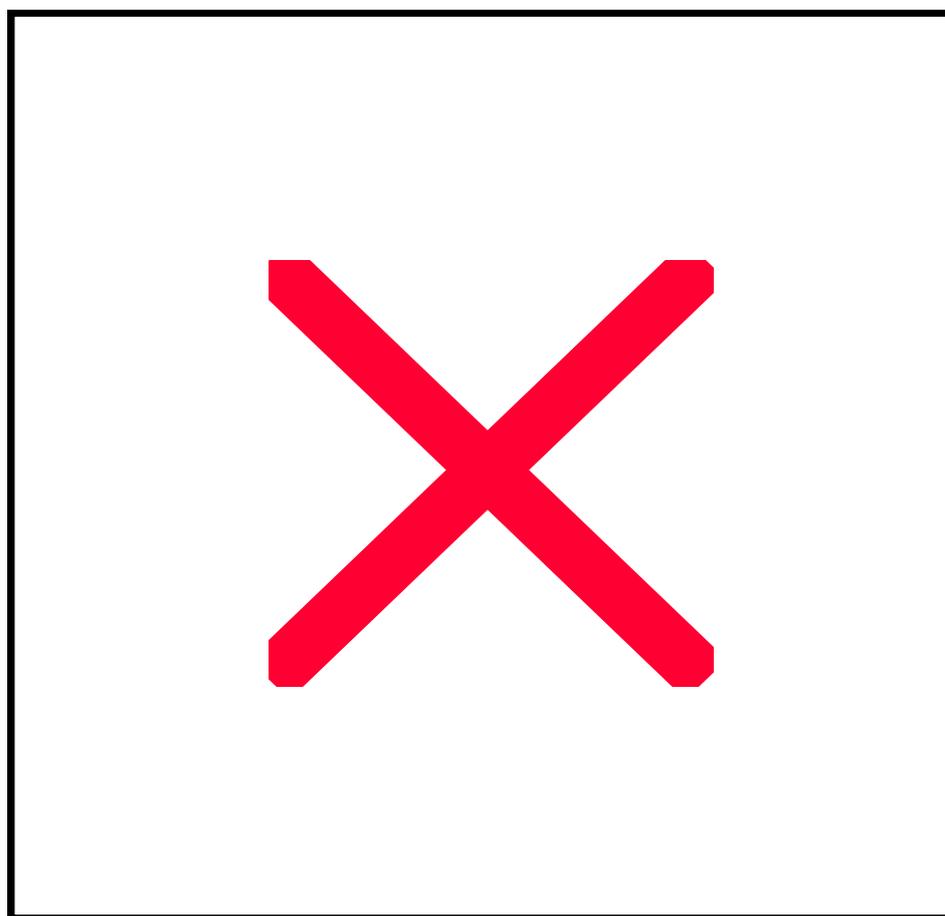


Рис. 4 Зависимость пропускной способности станции от ускорения (замедления) метропоезда.

В зависимости, представленной на Рис.4, присутствует эффект «насыщения»: при увеличении ускорений (замедлений) от 0,2 м/с² до 1,2 м/с² пропускная способность растет почти пропорционально их росту, а при дальнейшем росте ускорений (замедлений) темп роста пропускной способности заметно сокращается.

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

Таблица 2

Модель вагона	Среднее ускорение, м/с ²	Среднее замедление, м/с ²
мод. 81.717/714	0,98	1,28
мод. 81.720/721	0,79	1,11

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

- для метropоездов из вагонов мод. 81.717/714 - 47 поездов/час
- для метropоездов из вагонов мод. 81.720/721 - 43 поезда/час.

Реально на Московском метрополитене метropоезда из вагонов мод. 81.717/714 эксплуатируют с частотой движения 40 поездов/час. Но параметры вагонов позволяют эксплуатировать их с частотой движения – 47 поездов/час и скоростью сообщения 48 км/ч.

На Московском метрополитене на каждой радиальной линии имеются 5 - 6 наиболее загруженных в часы "пик" перегонов. Метropоезда проезжают эти перегоны за 15-20 минут. В это время их вагоны наиболее загружены. В районе этих перегонов на практике достигаются 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 15мин нагрузка вагонов составляет около 270 пасс./вагон). При работе на линии метropоездов из вагонов мод. 81.717/714, следующих с частотой 47 поездов в час, часовая провозная способность линии метрополитена составляет:

$$П = 200 \times 7 \times 47 = 66 \text{ тыс. пасс./ час}$$

Пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии для этих вагонов составляет:

$$П_{15} = 270 \times 7 \times 47 = 89 \text{ тыс. пасс./час}$$

При эксплуатации на линии метropоездов, составленных из вагонов с «идеальными» тяговыми и тормозными характеристиками, пропускная

способность станций метрополитена может достигнуть 52 поезда/час в одном направлении. При этом провозная способность линии при эксплуатации на ней 8-ми вагонных метropоездов длиной около 160м составит 83 тыс. пасс./час в одном направлении. Пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии составит:

$$П_{15} = 270 \times 8 \times 52 = 112 \text{ тыс. пасс./час}$$

Выводы

- 1.Средняя скорость поездки по городу на метро сегодня – около 22 км/ч. В будущем она может возрасти до 25 км/ч.
- 2.Провозная способность линии метрополитена при эксплуатации 8-ми вагонных метropоездов составляет сегодня - 75 тыс. пасс./час. в одном направлении. В будущем она может возрасти до 83 тыс. пасс./час в одном направлении.
- 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 метropоездов длиной около 160м – 83 тыс. пасс./час в одном направлении;
 - пиковая «пятнадцатиминутная» провозная способность линии метрополитена - 112 тыс. пасс./час.

Литература

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