

## ОБОСНОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЕЗДОВ НА УЧАСТКАХ ВСМ С КРУТЫМИ ЗАТЯЖНЫМИ СПУСКАМИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

**А.Н. ЧЕВГУН**

*E.mail. ksucta@elcat.kg*

*Тик эңкейиштер жана ашып өтүүчү бийиктиктердин көп суммасы менен мүнөздөлгөн, татаал рельеф шарттарында жайгашкан жолдордун участкалары үчүн жогорку ылдамдыктагы магистралдарда поезддердин максималдуу ылдамдыктарын негиздөө сунушталган.*

*Предложено обоснование максимальной скорости поездов на высокоскоростных магистралях для участков дорог, расположенных в условиях сложного рельефа, характеризуемого крутыми уклонами склонов и большой суммой преодолеваемых высот.*

*There was suggested the high speed grounding of trains on the high speed trunk lines for the bits of road situated in terms of challenging terrain which is characterized by the steep back fall inclines and big sum of incline.*

Обоснование максимальной скорости поездов на высокоскоростных магистралях является одной из центральных задач эксплуатации таких линий. Особую значимость этот вопрос имеет для участков дорог, расположенных в условиях сложного рельефа, характеризуемого крутыми уклонами склонов и большой суммой преодолеваемых высот. В этих условиях, как показали предыдущие исследования //1, 2/, экономически целесообразно применять крутые уклоны продольного профиля пути.

В проблеме выбора максимальной скорости поездов на таких участках рельефа следует различать две задачи. Первая заключается в обосновании экономически рационального значения максимальной скорости поездов  $v_{\max}$  в пределах всего участка – глобальное ограничение скорости. Вторая задача связана с выбором рационального уровня ограничения максимальной скорости следования поездов по крутым затяжным спускам  $v_{\text{огр}}$  при установленном значении глобального ограничения скорости  $v_{\max}$  на данной линии. В общем случае  $v_{\text{огр}} \leq v_{\max}$ .

Исследование по решению первой задачи выполнено ранее /3/. Согласно полученным результатам:

- расход электроэнергии на тягу поездов  $a_T$  всегда возрастает при увеличении  $v_{\max}$  (были рассмотрены следующие значения  $v_{\max}$ : 200, 250, 300 и 350 км/ч);
- расходы по пробегу поезда  $c_{\text{пр}}$  обычно сокращаются при увеличении  $v_{\max}$ , однако при сравнительно пологих значениях максимального уклона продольного профиля  $i_{\max}$  (18—24‰) на кривой зависимости  $c_{\text{пр}}(v_{\max})$  наблюдается минимум величины  $c_{\text{пр}}$ , который соответствует  $v_{\max}=300$  км/ч.

Постановка второй задачи – установление оптимального уровня ограничения максимальной скорости следования поездов по крутым затяжным спускам – основана на следующих предположениях («интриге»). Если спуску предшествует подъем, при движении по которому скорость поезда значительно снижается, достигнув минимальной величины в последней точке подъема, то на последующем крутом спуске большого протяжения поезд, двигаясь в режиме полной тяги, может достигнуть максимально допускаемой скорости  $v_{\max}$  (глобального ограничения) и оставшуюся часть спуска следовать с этой скоростью либо в режиме торможения, либо в режиме ограниченной тяги – в зависимости от крутизны спуска и величины  $v_{\max}$ . Очевидно, что в этом случае средняя скорость поезда на данном участке будет максимальной, а время хода соответственно минимальным. При этом энергопотребление на тягу поезда окажется максимальным.

Такому варианту движения поезда по крутому затяжному спуску (с точки зрения увязки очертания кривой  $v(S)$  и режима движения) можно противопоставить следующий вариант:

некоторую часть спуска, сравнительно небольшую, поезд следует в режиме полной тяги и, достигнув скорости  $v_{огр}$ , которая существенно меньше  $v_{max}$ , оставшуюся большую протяженность спуска поезд преодолевает с этой скоростью  $v_{огр}$  в режиме торможения, экономя электроэнергию. По сравнению с первым вариантом время хода возрастет. Но какой из этих двух вариантов движения и, соответственно, какой уровень ограничения максимальной скорости поезда на спуске окажется экономичнее по более общему критерию «эксплуатационные расходы», априори утверждать невозможно.

Результат и, соответственно, выбор наиболее эффективного варианта в значительной степени зависит от соотношения между  $v_{огр}$  и  $v_{max}$ , величины уклона  $i_{max}$  и длины спуска с этим уклоном. Кроме того, на эффективность каждого из вариантов может оказать влияние общее очертание (конфигурация) продольного профиля ВСМ на участке значительного протяжения. Однако есть основания предполагать, что в каждом конкретном случае существует оптимальное по тому или иному критерию значение максимальной скорости следования поездов по затяжным спускам.

### **Обоснование рационального уровня ограничения максимальной скорости поездов на крутых затяжных спусках**

Для исследования принят участок ВСМ, включающий два элемента продольного профиля пути с максимальной величиной уклонов одного направления (на спуск)  $i_{max}$ , имеющих разную длину – 15 и 10 км. Значение  $i_{max}$  рассмотрено в трех вариантах: 24, 30 и 42 ‰. Между этими элементами с уклоном  $i_{max}$  расположен один элемент продольного профиля с уклоном обратного направления, характеризуемый подъемом 18 ‰ и длиной 10 км. Первому спуску с уклоном  $i_{max}$  предшествует подъем с уклоном 24 ‰ длиной 20 км, а за вторым спуском с тем же значением  $i_{max}$  следует подъем уклоном 14 ‰ длиной 12 км. Общая протяженность рассматриваемого участка ВСМ составляет 67 км, схема продольного профиля этого участка приведена на рис. 1 (элементы профиля с уклонами переходной крутизны здесь не показаны).

Тяговые и эксплуатационно-экономические расчеты выполнены применительно к электропоезду с головными и промежуточными моторными вагонами, способному реализовать максимальную скорость  $v_{max}=350$  км/ч (глобальное ограничение скорости на ВСМ).

Уровень ограничения максимальной скорости поезда  $v_{огр}$  на спусках крутизной  $i_{max}$  рассмотрен в трех вариантах: 350, 300 и 250 км/ч. Таким образом, в первом варианте значение  $v_{огр}=350$  км/ч совпадает с принятой величиной глобального ограничения максимальной скорости  $v_{max}$ , т.е. в этом варианте дополнительного ограничения скорости поезда на крутых затяжных спусках не предусмотрено. Данный вариант является основой для сравнения с ним вариантов с другими значениями  $v_{огр}$ .

Кривые скорости движения поезда  $v(S)$  по рассматриваемому участку ВСМ в направлении крутых спусков (условно «туда») показаны на рис. 1 для  $i_{max}=30$  ‰ при трех указанных величинах величины  $v_{огр}$ . Для этих вариантов значение скорости в начальной точке участка принято одним и тем же 350 км/ч. С целью повышения объективности при сравнении эксплуатационно-экономических показателей рассматриваемых вариантов движения поезда желательно, чтобы и в конечной точке данного участка пути у этих вариантов скорости совпадали. Для этого в вариантах с уровнем ограничения скорости 350 и 300 км/ч в конце участка применено торможение, обеспечившее одинаковую для трех вариантов скорость поезда в конечной точке рассматриваемого участка.

Тяговые показатели движения поезда по рассматриваемому участку ВСМ для разных значений  $i_{max}$  и при трех указанных вариантах ограничения максимальной скорости на крутых спусках приведены в табл. 1. Все показатели, кроме средней скорости поезда на участке  $v_{ср}$ , представлены в удельном исчислении, т.е. отнесены на 1 км длины участка: работа силы тяги поезда  $r_m$ ; работа сил сопротивления движению поезда  $r_w$ ; работа тормозных сил поезда  $r_b$ ; расход электроэнергии на тягу поезда  $a_m$ .

Таблица 1

## Результаты тяговых расчетов на рассматриваемом участке ВСМ

Удельные показатели движения поезда	Максимальный уклон спусков $i_{\max}$ , ‰								
	42			30			24		
	Уровень ограничения максимальной скорости поезда на спусках $v_{\text{огр}}$ , км/ч								
	350	300	250	350	300	250	350	300	250
$V_{\text{ср}}$ , км/ч	305,7	283,2	255,0	304,4	282,9	255,0	303,0	282,6	254,9
$\Gamma_{\text{м}}$ , МДж/п·км	138,10	134,43	129,74	146,38	133,98	129,74	153,82	139,690	129,77
$\Gamma_{\text{w}}$ , МДж/п·км	195,26	144,90	121,41	134,84	114,00	121,41	154,23	142,94	121,35
$\Gamma_{\text{б}}$ , МДж/п·км	30,88	47,56	66,35	13,09	21,56	36,45	11,62	8,78	20,44
$a_{\text{т}}$ , кВт·ч/п·км	48,344	47,053	45,413	51,244	48,024	45,413	53,8451	48,8947	45,42
$\kappa_{\text{вт}}$ , кВт·ч/п·км	1,92	7,14	1,59	8,53	3,51	7,82	42	,06	41,16

*Примечание.* В числителе – без учета возвращенной электроэнергии при рекуперативном торможении, в знаменателе – с учетом возвращенной электроэнергии при рекуперативном торможении.

Анализ главных показателей движения поезда свидетельствует о следующем.

Изменение крутизны спусков с максимальным уклоном (от  $i_{\max}=42\text{‰}$  до  $i_{\max}=24\text{‰}$ ) не оказало сколько-нибудь заметного влияния на величину средней скорости поезда на участке. Это объясняется, с одной стороны, принятым очертанием продольного профиля участка, а с другой стороны – принятым одинаковым значением скорости поезда в начальной точке участка ( $v_{\text{н}}=350$  км/ч) во всех рассмотренных вариантах  $i_{\max}$ . Таким образом, в данной модели исследования нейтрализовано влияние крутизны максимальных уклонов спусков на время хода поезда по участку. Такой подход в этом исследовании представляется оправданным, поскольку анализу влияния  $i_{\max}$  на длину линии и тягово-эксплуатационные показатели движения было посвящено отдельное исследование.

Снижение уровня ограничения максимальной скорости следования поезда по крутым спускам  $v_{\text{огр}}$  с 350 до 300 км/ч привело к уменьшению средней скорости на 22,5-20,4 км/ч, т.е. на 7,4-6,7 % (большие величины соответствуют  $i_{\max}=42$  ‰, а меньшие -  $i_{\max}=24$  ‰). Если максимальную скорость поезда на спуске ограничить значением  $v_{\text{огр}}=250$  км/ч, то по сравнению с базовым уровнем  $v_{\text{огр}}=350$  км/ч средняя скорость снизится на 50,7- 48,1 км/ч, т.е. на 19,9-18,9 %.

Важной характеристикой перевозочного процесса является его энергоемкость, значительная доля которой отражается в показателе энергопотребления на тягу поезда.

Расход электроэнергии на тягу поезда  $a_{\text{т}}$  уменьшается при понижении уровня ограничения максимальной скорости движения поезда по крутым затяжным спускам. Получаемая при этом экономия энергозатрат охватывает широкий диапазон. Так, при снижении  $v_{\text{огр}}$  с 350 до 300 км/ч величина  $a_{\text{т}}$  уменьшилась на 1,3- 4,4 кВт·ч/п·км, т.е. на 2,7- 9,2 % (меньшее значение соответствует  $i_{\max}=42$  ‰, большее –  $i_{\max}=24$  ‰). Если принять  $v_{\text{огр}}=250$  км/ч, то по сравнению с базовым вариантом ( $v_{\text{огр}}=350$  км/ч) энергопотребление поездом снизится на 2,9- 8,4 кВт·ч/п·км, т.е. на 6,1- 15,6 %. Полученное сокращение расхода электроэнергии оказалось не столь значительным из-за противонаправленного действия двух факторов:

- с одной стороны, с уменьшением  $v_{\text{огр}}$  сократилась протяженность участков пути в пределах крутых спусков, проходимых поездом в режиме тяги – соответственно уменьшилось энергопотребление на тягу поезда;
- с другой стороны, чем ниже  $v_{\text{огр}}$ , тем с меньшими скоростями поезд преодолевает в режиме тяги подъем 18 ‰, следующий за первым крутым спуском, и также с меньшими скоростями поезд следует в режиме тяги по подъему 14 ‰, расположенному за вторым крутым спуском – соответственно возросло энергопотребление на тягу поезда.

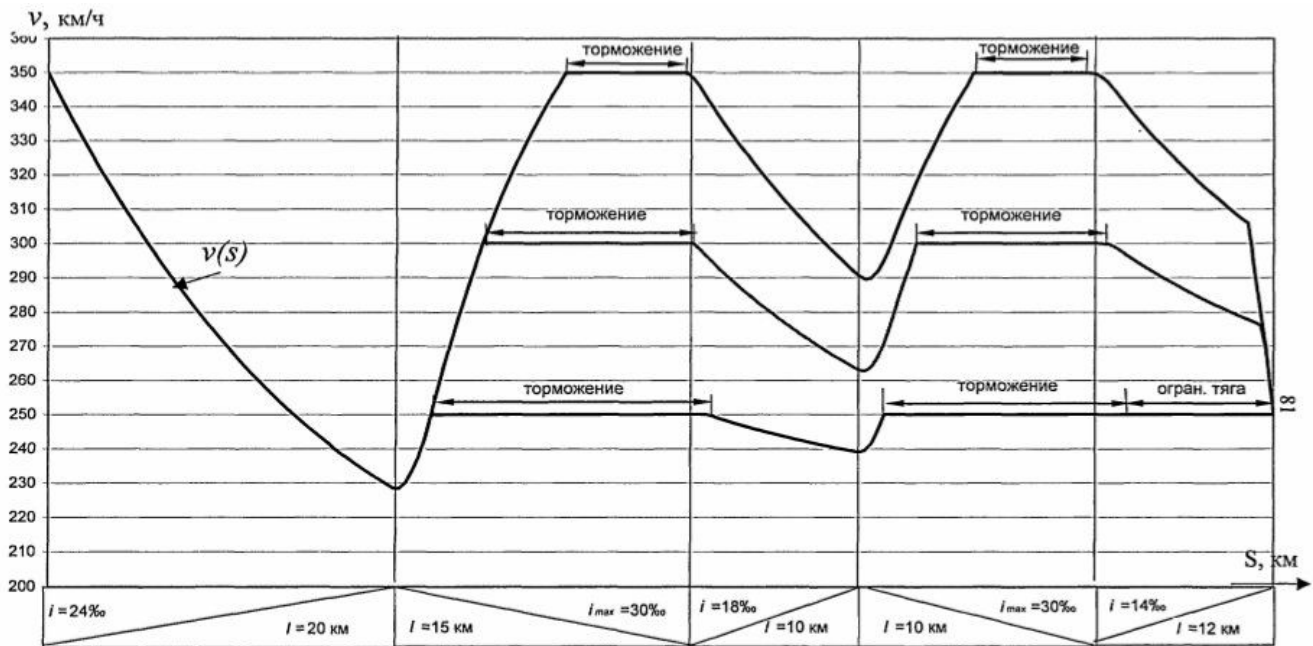


Рис. 1. Пример построения кривых скорости движения поезда  $v(s)$  в направлении «туда» (условно «на спуск») при трех вариантных значениях  $v_{огр}=350, 300$  и  $250$  км/ч

Анализ показал, что сокращение расхода электроэнергии по первому фактору превалирует над увеличением  $a_T$  по второму фактору.

Обращает внимание существенное различие в экономии энергозатрат на передвижение поезда в вариантах использования весьма крутого ( $i_{max}=42\%$ ) и сравнительно пологого ( $i_{max}=24\%$ ) уклонов продольного профиля на затяжных спусках. В последнем случае при понижении уровня ограничения максимальной скорости на спусках энергопотребление на тягу сократилось в значительно большей степени, чем в первом. Этот результат обусловлен следующим обстоятельством.

На спусках крутизной  $42\%$  независимо от принятого уровня скорости  $v_{огр}$  ( $350, 300$  или  $250$  км/ч) поезд, достигнув этой скорости в режиме тяги, оставшуюся часть спуска проходит в режиме торможения не потребляя электроэнергию на перемещение. На спусках крутизной  $24\%$  такая картина имеет место при  $v_{огр}=300$  км/ч и  $v_{огр}=250$  км/ч. Когда уровень ограничения скорости на спусках соответствует величине глобального ограничения скорости, т.е.  $v_{огр}=v_{max}=350$  км/ч, поезд, достигнув этой скорости в режиме полной тяги, дальше продолжает движение в режиме «ограниченная тяга», потребляя электроэнергию. Очевидно, что размер экономии энергоресурсов при уменьшении уровня  $v_{огр}$  в вариантах использования сравнительно пологих значений  $i_{max}$  следует ожидать большим, чем в вариантах применения весьма крутых уклонов продольного профиля пути. Результаты выполненных расчетов подтвердили это предположение.

Возможность рекуперации электроэнергии при торможении существенно уменьшает общую величину энергопотребления на передвижение поезда, причем сокращение расхода электроэнергии тем больше, чем ниже уровень ограничения максимальной скорости поезда на крутых затяжных спусках. Кроме этого, сама крутизна спусков оказывает значительное влияние на величину возврата электроэнергии при рекуперативном торможении. Естественно, чем круче спуск, тем больше возврат энергоресурсов. В табл. 2 приведены показатели экономии электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на рассматриваемом участке ВСМ.

Таблица 2

Экономия энергоресурсов при рекуперативном торможении (в процентах)

Максимальный уклон спусков $i_{\max}$ , ‰	Уровень ограничения максимальной скорости поезда на спусках $v_{\text{огр}}$ , км/ч		
	350	300	250
42	13,3	21,1	30,4
30	5,3	9,4	16,7
24	4,5	3,7	9,4

В варианте использования  $i_{\max}=24$  ‰ обращает на себя внимание, что при  $v_{\text{огр}}=300$  км/ч имеет место минимальная в процентном отношении экономия энергоресурсов при рекуперативном торможении (см. табл. 2). Расчетный анализ показал, что это является следствием того, что сама абсолютная величина возврата электроэнергии при  $v_{\text{огр}}=300$  км/ч меньше, чем при  $v_{\text{огр}}=350$  км/ч, и особенно меньше, чем при  $v_{\text{огр}}=250$  км/ч.

Характер зависимости расходов по пробегу поезда  $c_{\text{пр}}$  в функции уровня ограничения максимальной скорости  $v_{\text{огр}}$  следования поезда по крутым спускам обусловлен степенью влияния отдельных слагаемых, формирующих величину  $c_{\text{пр}}$ .

Расходы по пробегу поезда  $c_{\text{пр}}$  вычисляются по формуле

$$c_{\text{пр}} = R_M e_{R_M} + R_W e_{R_W} + R_B e_{R_B} + A_T e_{A_T} + L \cdot (e_{MC} 10^{-3} + Q e_{pl} 10^{-6}) + T(e_{\text{мн}} + e_{\text{нас}} + \gamma), \quad (1)$$

где  $R_M$  – механическая работа силы тяги поезда, МДж;  $R_W$  – механическая работа сил основного сопротивления, МДж:

$$R_W = R_c - R_B, \quad (2)$$

$R_c$  – механическая работа сил полного сопротивления, МДж:

$$R_c = R_M - Qg\Delta H 10^{-3} - 3.86Q(1 + \gamma)(V_K^2 - V_H^2) 10^{-5}, \quad (3)$$

$R_B$  – механическая работа тормозных сил, МДж;  $A_T$  – расход электроэнергии, кВт·ч;  $L$  – длина рассматриваемого участка, км;  $T$  – время хода поезда по данному участку, ч;  $Q$  – масса поезда, т;  $\Delta H$  – разница преодолеваемых высот, м;  $V_H$  и  $V_K$  – начальная и конечная скорости поезда на данном участке, км/ч;  $e_{R_M}$ ,  $e_{R_W}$ , ... – нормы эксплуатационных расходов на единицу измерителя.

Формула (1) учитывает стоимость пробега поездом рассматриваемого участка пути, когда отсутствует рекуперация электроэнергии при торможении.

В случае учета рекуперированной при торможении электроэнергии расходы по пробегу поезда определяются по формуле (4)

$$c_{\text{пр(р)}} = c_{\text{пр}} - a_{\text{дв}} \cdot e_G - 0,9R_W \cdot e_{R_c} - 1,4R_W \cdot e_{R_c} + a_{\text{дв}} \cdot e_{a_{\text{дв}}} + 0,49R_B \cdot e_{R_c} + 0,35(P + Q) \cdot e_{pl} \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где  $c_{\text{пр(р)}}$  – стоимость пробега поезда на рассматриваемом участке пути в рекуперативном режиме;  $c_{\text{пр}}$  – стоимость пробега поезда на том же участке пути без учета рекуперативного движения;  $a_{\text{дв}}$  – количество электроэнергии, выработанное двигателем электропоезда в рекуперативном режиме, кВт·ч.

Предпоследнее слагаемое в формуле (4), учитывающее дополнительный неравномерный износ рельсов на участках пути, проходимых тяжелыми грузовыми поездами в режиме рекуперативного торможения, в данном исследовании в расчет не принималось, поскольку здесь рассматриваются легкие пассажирские поезда с распределенной тягой и торможением по длине состава, вследствие чего указанного износа рельсов практически не будет.

Результаты проведенного статистического исследования таковы.

- Отсутствие ограничения максимальной скорости следования поездов по затяжным спускам, наряду с обеспечением минимального времени хода, приводит во всех случаях к максимальному расходу электроэнергии.
- Ограничение максимальной скорости практически всегда обеспечивает снижение энергозатрат на передвижение поездов. Экономия энергоресурсов тем значительней, чем ниже уровень ограничения максимальной скорости и чем протяженнее такие спуски. Наибольший эффект имеет место при использовании сравнительно пологих значений  $i_{\max}$  (20-24 ‰).
- Для критерия «расходы по пробегу поездов» однозначного решения нет: при отсутствии рекуперации электроэнергии в большинстве случаев целесообразно ограничивать скорость поездов на уровне 250 км/ч; учет рекуперации электроэнергии приводит к 100-процентному числу случаев, когда выгодно применять наименьшее из рассмотренных ограничений скорости поезда.
- Если перед станцией, на которой предусмотрена остановка поезда, расположен затяжной спуск, то экономически рационально в пределах данного спуска поддерживать скорость выхода поезда на этот спуск. Необходимость повышения скорости на таком спуске оправдана лишь тогда, когда надо обеспечить требуемое время хода поезда.

### Список литературы

1. Кантор И.И., Копыленко В.А., Исмагулова С. К обоснованию максимального уклона продольного профиля высокоскоростной специализированной магистрали //Трансп. стр-во. – 1990. – С. 8-11.
2. Копыленко В.А., Низовских В.Ю. Техничко-экономические предпосылки использования крутых уклонов продольного профиля пути на высокоскоростных магистралях //Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. – 2003. – № 2-3. – С. 27-33.
3. Копыленко В.А., Буякова В.Н. Проектирование ресурсосберегающих трасс ВСМ //Ж.-д. тр-т. – 1999. – № 3. – С. 13-17.