

ТРАНСПОРТ

УДК 656.2

С.В. Карасёв, А.Д. Калидова

Использование кинетических участков замедления и разгона на трассах высокоскоростных и скоростных магистралей

Одним из основных препятствий при развитии высокоскоростных магистралей является высокая стоимость сооружения и эксплуатации инфраструктуры специализированных линий, оказывающая негативное влияние на окупаемость инвестиций. Общей чертой всех стран, имеющих высокоскоростные магистрали, является высокая плотность населения, которая позволяет окупать значительные инвестиции в инфраструктуру за счет интенсивного высокоскоростного и скоростного движения. При низкой плотности населения, незначительном пассажиропотоке, большой протяженности линии (все эти факторы характерны для большей части территории России) на первый план выходит необходимость сокращения объема необходимых инвестиций, в частности, за счет обоснования рациональных параметров трассы.

В статье изложена идея проектирования энергоэффективного продольного профиля высокоскоростной трассы за счет использования кинетических участков замедления и разгона вблизи остановочных пунктов, а также элементов трассы с ограничением скорости движения. Предложен способ приближенного аналитического расчета экономии энергетических затрат высокоскоростных (скоростных) поездов за счет проектирования кинетических участков. Выполнены расчеты по оценке изменения кинетической энергии и скорости движения поезда за счет взаимного преобразования кинетической энергии поезда и потенциальной энергии, связанной с конструкцией продольного профиля трассы. Получены зависимости экономии энергозатрат и величины снижения скорости от длины и уклона кинетических участков.

Ключевые слова: *высокоскоростные магистрали, энергоэффективность, кинетическая энергия, энергия движения поезда, участки разгона и замедления, кинетические участки, продольный профиль.*

С конца XX в. в ряде стран происходит активное развитие высокоскоростного железнодорожного движения. Протяженность сетей высокоскоростных магистралей (ВСМ) в мире растет темпами, сопоставимыми с началом века, когда сооружалась сеть обычных железных дорог. После ввода в постоянную эксплуатацию в 1965 г. в Японии линии «Синкансен» эстафета в начале 80-х гг. была подхвачена европейскими странами. Развитые сети ВСМ к настоящему времени охватывают практически всю Европу, ряд стран Юго-Восточной Азии. На лидирующую позицию в последнее десятилетие вышел Китай, протяженность ВСМ в котором уже существенно превосходит весь остальной мир. Высокая плотность населения, значительный объем перевозок, характерные для этих стран, способствуют более быстрой окупаемости инфраструктуры ВСМ даже при большом количестве искусственных сооружений, позволяющих использовать минимальные уклоны продольного профиля трассы.

Потенциальное строительство ВСМ в России, особенно за Уралом, имеет ряд особенностей, связанных с низкой плотностью населе-

ния, большой и малоосвоенной территорией, сложными природными и климатическими условиями. Эти факторы приводят к существенному увеличению объема необходимых инвестиций в высокоскоростное и скоростное движение. Следовательно, возникает проблема поиска путей снижения этих затрат.

Особенно большое значение задача сокращения стоимости сооружения и эксплуатации ВСМ имеет при невысокой загрузке высокоскоростных магистралей, предполагаемой в случае строительства таких магистралей в Сибири и на Дальнем Востоке. Другим важным фактором является необходимость прокладки ВСМ в условиях сложного рельефа, с большим перепадом высот, преодоление которого требует либо строительства искусственных сооружений, либо использования значительных руководящих уклонов. Таким образом, возникает задача рационального проектирования продольного профиля трассы ВСМ с учетом изменения капитальных затрат на сооружение, а также расходов по движению поездов.

Повышение энергосбережения при вождении поездов, как правило, обеспечивается за счет оптимизации режимов вождения. В то же

время при эксплуатации новых скоростных и высокоскоростных линий имеется возможность сокращения затрат на тягу при условии их учета на этапе проектирования продольного профиля трассы. В частности, при благоприятных условиях рельефа местности проектирование отдельных элементов трассы на подъемах и спусках, с одной стороны, поможет уменьшить объемы и стоимость строительных работ, с другой стороны, позволит сократить энергетические затраты на тягу и торможение скоростных поездов за счет использования потенциальной энергии при проходе подъемов и спусков на трассе.

Эксплуатация скоростных и особенно высокоскоростных магистралей характеризуется высокими скоростями движения поездов (высокоскоростные поезда – свыше 250 км/ч, скоростные – свыше 200 км/ч), которые соответствуют большим значениям кинетической энергии [1, с. 229]. Кинетическая энергия приобретает за счет силы тяги локомотива или моторных вагонов, а также за счет преобразования из потенциальной энергии, связанной с очертанием продольного профиля линии (при движении на спуск), и расходуется на преодоление сил сопротивления движению, а также путем обратного преобразования в потенциальную энергию (при преодолении подъемов продольного профиля трассы). При необходимости торможения избыточная кинетическая энергия поглощается за счет работы тормозной системы поезда. В процессе движения скоростного (высокоскоростного) поезда можно говорить о качестве использования кинетической энергии. Имеется в виду, в частности, возможность ее использования для улучшения динамики разгона поезда. Может иметь место и отрицательное влияние, при котором излишняя кинетическая энергия приводит к дополнительным энергозатратам на торможение поезда за счет действия тормозных сил [2, с. 87].

Поскольку одним из факторов, влияющих на величину кинетической энергии, является ее преобразование, в соответствии с законом сохранения энергии, в потенциальную (и обратно), можно сформулировать *задачу проектирования трассы высокоскоростных и скоростных линий в части параметров подъемов и спусков (величина их уклонов, расположение) с учетом оптимизации использования ки-*

нетической энергии поезда. Решение этой задачи при прочих равных условиях позволит повысить энергоэффективность высокоскоростного движения и при благоприятных условиях сократить расходы, связанные с движением поездов. В данной статье будут рассматриваться возможности такой оптимизации продольного профиля.

При проектировании трассы высокоскоростной или скоростной магистрали важным вопросом является определение рациональных уклонов трассирования [3, с. 115]. Применительно к проектированию обычных железных дорог в настоящее время нормативные документы предусматривают следующие требования:

1. На перегонах:

- продольный профиль пути проектируется элементами максимальной возможной длины при наименьшей алгебраической разности уклонов смежных элементов;

- наибольший уклон на линиях I и II категорий обычно не превышает 18 и 20 ‰ соответственно;

- в случае превышения допускаемой нормами алгебраической разности уклонов смежных элементов они сопрягаются при помощи разделительных элементов переходной крутизны;

- перед затяжным спуском может проектироваться участок пути с пологими уклонами длиной не менее 1,5 км для опробования тормозов в пути следования [4, с. 27].

2. На отдельных пунктах:

- станции, разъезды и обгонные пункты обычных железных дорог рекомендуется размещать на горизонтальной площадке или при обосновании на уклонах не круче 1,5 ‰ (в трудных условиях – не круче 2,5 ‰). При этом в случае оставления подвижного состава без локомотива для предотвращения ухода подвижного состава продольный профиль пути, как правило, проектируется вогнутого очертания в пределах полезной длины путей;

- площадки *разъездов и обгонных пунктов*, размещаемых в легких топографических условиях, следует, по возможности, располагать на возвышениях профиля (горбах), а участки, предшествующие входным сигналам, на протяжении, равном полезной длине прямо-отправочных путей, – на уклонах,

обеспечивающих трогание поезда с места [4, с. 35].

Таким образом, существующие нормативы не учитывают предполагаемую оптимизацию конструкции продольного профиля.

Обратим внимание на то, что последний пункт из перечисленных предполагает размещение площадок раздельных пунктов с небольшим путевым развитием на возвышениях профиля.

При необходимости размещения на существующей или проектируемой скоростной и особенно высокоскоростной линии промежуточных остановочных пунктов они, очевидно, либо не будут иметь путевого развития, либо будут иметь его в минимальном объеме, совмещаться с обгонными пунктами или разъездами [5, с. 66]. Поскольку особых требований к продольному профилю путей таких пунктов для скоростных и высокоскоростных линий пока не предусматривается, целесообразно рассмотреть этот вопрос подробнее.

Одной из возможностей оптимизации продольного профиля высокоскоростной трассы с учетом эксплуатации подвижного состава является обоснование конструкции профиля на подходе к остановочным пунктам [6, с. 436].

Задача обоснования вариантов размещения площадок остановочных пунктов на трассе должна быть связана со следующими факторами:

1) динамикой разгона скоростных поездов, которая, в свою очередь, зависит от их

типа – с локомотивной (сосредоточенной) или распределенной тягой;

2) формой рельефа и стоимостью работ по его «сглаживанию» при применении меньших уклонов трассирования.

Для улучшения динамики разгона и торможения при благоприятных условиях предлагается следующее решение: трассу на подходе к остановочному пункту проектировать в профиле выпуклой формы (рис. 1). Такое решение улучшит условия замедления поезда на подходе к остановочному пункту, трогание с места и разгон после остановки. Благоприятным условием в этом случае будет наличие естественных возвышений рельефа по оси трассы, которые позволят получить выпуклое очертание профиля при минимальных объемах земляных работ.

Зоны, соответствующие расчетным расстояниям L_p , L_z , далее будут называться *кинетическими участками замедления и разгона*.

Обоснованное расположение остановочных пунктов на возвышениях трассы, соответствующих очертанию рельефа, может обеспечить сокращение капитальных затрат на земляные работы и искусственные сооружения, а также эксплуатационных расходов по пробегу скоростных (высокоскоростных) поездов [7, с. 41].

При скоростях движения поездов 200–300 км/ч подъемы на подходе к остановочному пункту потребуются устраивать на значительном протяжении – до нескольких километров с каждой стороны.

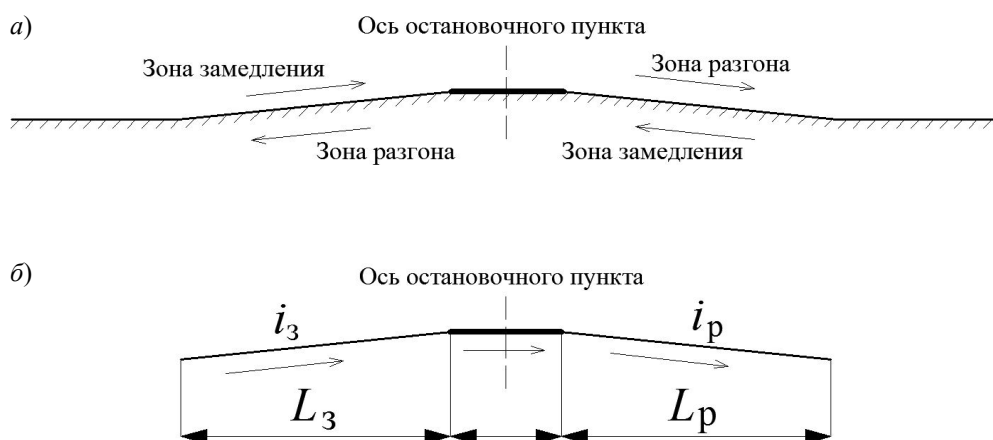


Рис. 1. Рекомендуемое очертание продольного профиля для проектирования остановочного пункта ВСМ и подходов к нему:

а – конфигурация продольного профиля; б – схема расчетных расстояний; L_p , L_z – расчетная длина зоны разгона и замедления, i_p , i_z – уклоны соответствующих кинетических участков

Наличие противоуклона (подъема) перед остановочным пунктом будет приводить к погашению части кинетической энергии поезда E_k (преобразованию в потенциальную энергию E_n) за счет преодоления перепада высот на длине этого элемента (или нескольких элементов) профиля [8, с. 17].

Общий перепад высот можно определить по известной формуле

$$\Delta H = \sum i_3 L_3 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где i_3 – уклон рассматриваемого участка трассы, ‰; L_3 – длина кинетического участка замедления, м.

Рассмотрим систему сил, действующую на скоростной поезд на участке замедления (рис. 2). При расположении состава на уклоне, длина которого больше длины состава, последний можно условно рассматривать в виде материальной точки. В этом случае на состав действует сила тяжести Q , которая раскладывается на две составляющие: P – перпендикулярную силу к наклонной плоскости (нормальное давление), W – силу сопротивления движению от уклона [9, с. 17–19].

Из рис. 2 видно, что:

$$P = Q \cos \alpha; \quad (2)$$

$$W = Q \sin \alpha. \quad (3)$$

При углах наклона трассы до 50 ‰ (это соответствует примерно 3°) $\sin \alpha \approx \tan \alpha = i_3 \cdot 10^{-3}$, тогда сила дополнительного сопротивления W от преодоления поездом уклона равна:

$$W = Q \sin \alpha = Q i_3 \cdot 10^{-3}. \quad (4)$$

Работа силы дополнительного сопротивления W от преодоления подъема

$$A = W L_3. \quad (5)$$

Эта работа будет численно равна поглощенной за счет подъема кинетической энергии E_k поезда:

$$E_k = \frac{Q \Delta v^2}{2} = A = W L_3 = Q i_3 \cdot 10^{-3} \cdot L_3, \quad (6)$$

где Δv – уменьшение скорости за счет преобразования части кинетической энергии в потенциальную.

Ниже приведены графики, показывающие зависимость поглощенной кинетической энергии от длины и крутизны противоуклона, а также снижения скорости поезда Δv в процессе преодоления подъема перед остановочным пунктом от длины замедляющего противоуклона L_3 и его величины i_3 .

Были рассмотрены следующие значения величин: $L_3 = 1 \dots 5$ км с шагом 1 км; $i_3 = 5 \dots 25$ ‰ с шагом 5 ‰; масса скоростных пассажирских поездов рассматривалась исходя из вида тяги (распределенная или сосредоточенная). Для наглядности результаты расчетов сведены в таблицу.

На рис. 3 и 4 показана зависимость поглощенной кинетической энергии от длины и крутизны противоуклона при массе поезда 380 и 670 т соответственно.

На рис. 5 и 6 отражена зависимость снижения скорости поезда от длины противоуклона при массе поезда 380 и 670 т соответственно.

Полученные зависимости показывают, что использование протяженных кинетических участков на подходе к остановочным пунктам высокоскоростной или скоростной трассы приводит к существенному уменьшению скорости в случае использования протяженных элементов с большими уклонами. Так, например, при длине кинетического участка замедления 3 км и величине уклона 10 ‰ скорость поезда может быть уменьшена на 20–30 км/ч. Аналогичный эффект имеет устройство относительно короткого кинетического участка в 1 км при уклоне 25 ‰.

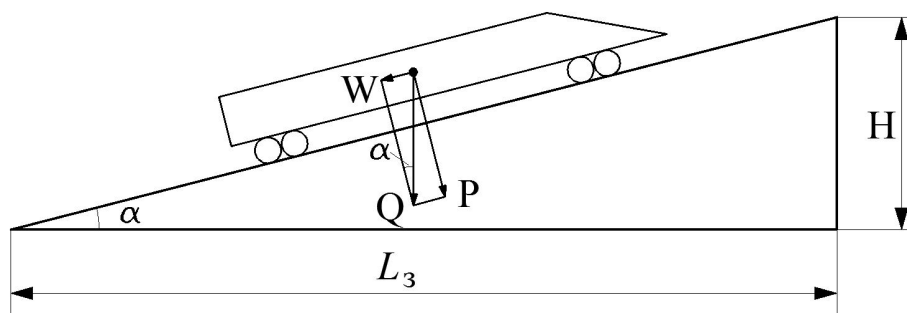


Рис. 2. Силы, действующие на поезд на уклоне

**Расчеты поглощения кинетической энергии и снижения скорости при проектировании
противоуклонов на подходе к остановочным пунктам скоростной трассы**

Уклон i_z , ‰	Длина про- тивоуклона L_z , км	Поглощенная кинетическая энергия E_k , МДж, для массы поезда		Снижение скорости Δv , км/ч, для массы поезда	
		380 т	670 т	380 т	670 т
5	1	1,9	3,35	11,38	8,57
5	2	3,8	6,70	16,10	12,12
5	3	5,7	10,05	19,72	14,85
5	4	7,6	13,40	22,77	17,15
5	5	9,5	16,75	25,46	19,17
10	1	3,8	6,70	16,10	12,12
10	2	7,6	13,40	22,77	17,15
10	3	11,4	20,10	27,89	21,00
10	4	15,2	26,80	32,20	24,25
10	5	19,0	33,50	36,00	27,11
15	1	5,7	10,05	19,72	14,85
15	2	11,4	20,10	27,89	21,00
15	3	17,1	30,15	34,15	25,72
15	4	22,8	40,20	39,44	29,70
15	5	28,5	50,25	44,09	33,20
20	1	7,6	13,40	22,77	17,15
20	2	15,2	26,80	32,20	24,25
20	3	22,8	40,20	39,44	29,70
20	4	30,4	53,60	45,54	34,29
20	5	38,0	67,00	50,91	38,34
25	1	9,5	16,75	25,46	19,17
25	2	19,0	33,50	36,00	27,11
25	3	28,5	50,25	44,09	33,20
25	4	38,0	67,00	50,91	38,34
25	5	47,5	83,75	56,92	42,87

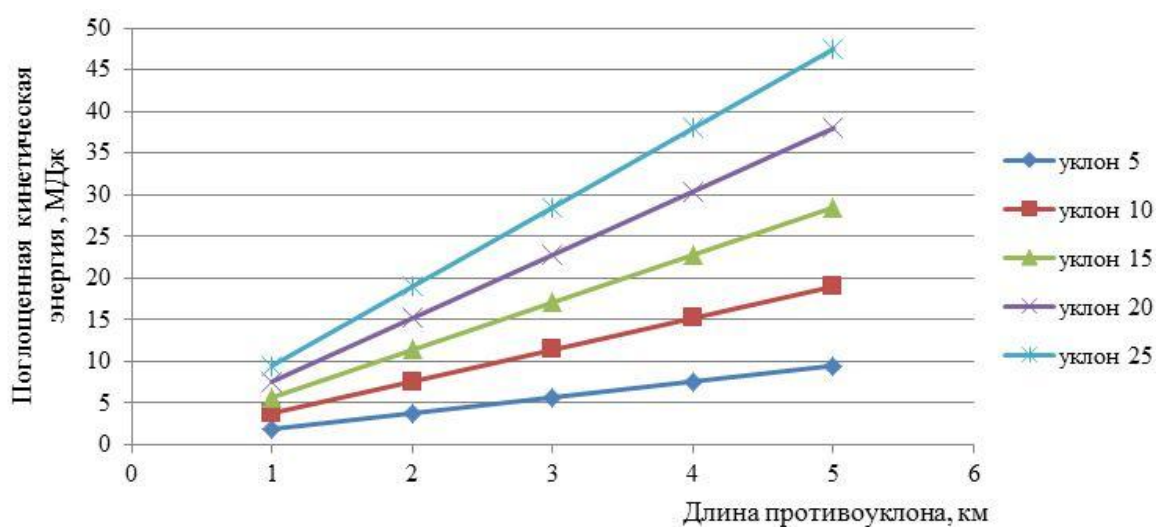


Рис. 3. Зависимость поглощенной кинетической энергии от длины противоуклона L_z при массе поезда 380 т

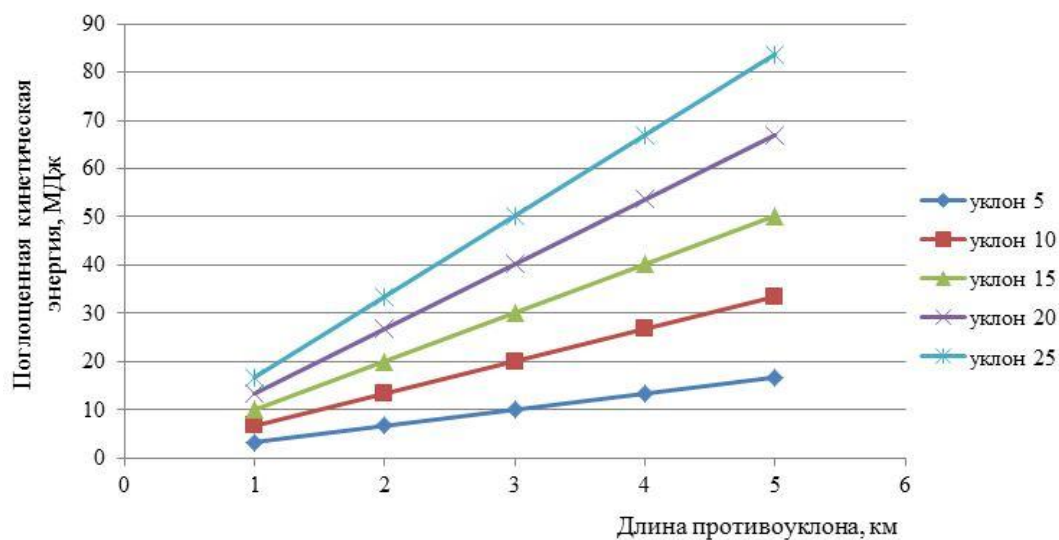


Рис. 4. Зависимость поглощенной кинетической энергии от длины противоуклона L_3 при массе поезда 670 т

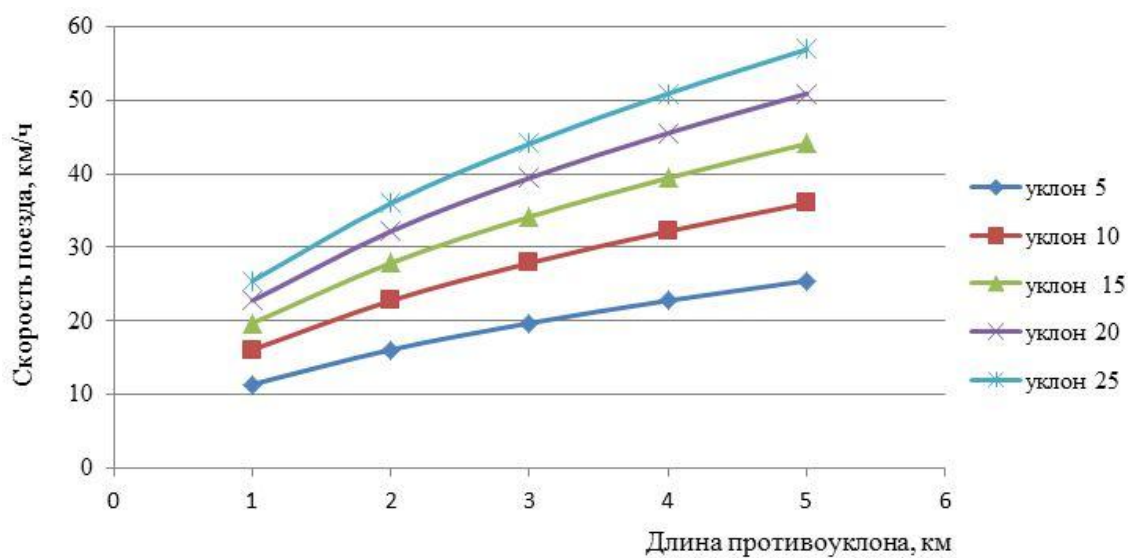


Рис. 5. Зависимость снижения скорости поезда от длины противоуклона при массе поезда 380 т

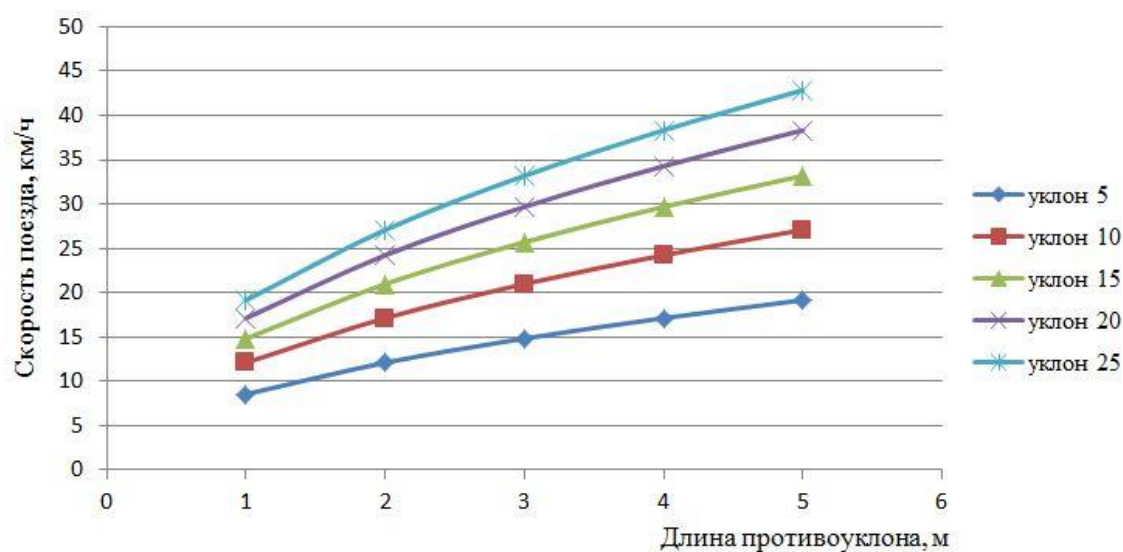


Рис. 6. Зависимость снижения скорости поезда от длины противоуклона при массе поезда 670 т

Предварительные расчеты показали, что величина изменения энергозатрат за счет использования кинетических участков незначительна. Однако при проектировании трассы в условиях рельефа с естественным перепадом высот рациональное использование этих условий для устройства кинетических участков замедления может способствовать уменьшению нагрузки на тормозную систему поезда и снижению соответствующих энергозатрат. Аналогичный эффект будет иметь устройство кинетических участков разгона, которые позволят экономить энергию тяги при необходимости набора поездом скорости.

Выше рассматривался случай использования кинетических участков, примыкающих к остановочным пунктам высокоскоростной или скоростной магистрали. В то же время они могут найти более широкое применение на участках трассы, требующих снижения скорости, т.е. при наличии элементов с ограничением скорости движения (например, круговых кривых, искусственных сооружений) [10, с. 260]. В этом случае использование кинетических участков при благоприятных для этого условиях рельефа также позволит обес-

печить экономию энергозатрат, связанных с движением скоростных (высокоскоростных) поездов.

Важно отметить, что рассмотренный выше метод описывает общий подход к проектированию «энергоэффективного» продольного профиля ВСМ в условиях сложного рельефа, позволяет оценить изменение энергозатрат на тягу поездов за счет кинетической энергии «в первом приближении» и является ориентировочным, поскольку не учитывает всех физических и технических факторов, влияющих на динамику движения поезда. Учет результатов, полученных предложенным методом, позволит повысить качество обоснования принципиальных вариантов конструкции продольного профиля трассы проектируемой ВСМ, в том числе вблизи раздельных пунктов.

Практическое использование предложенной идеи оптимизации продольного профиля ВСМ, с учетом энергоэффективности движения скоростных поездов, при выполнении технико-экономического обоснования требует на следующем этапе исследований создания более точных методов, основанных на тяговых расчетах.

Библиографический список

1. Калидова А.Д. Особенности организации скоростного (высокоскоростного) движения с использованием существующей инфраструктуры // Научные исследования: от теории к практике. 2015. № 5 (6). С. 229–231.
2. Кантор И.И. Продольный профиль пути и тяга поездов. М.: Транспорт, 1984. 207 с.
3. Карасёва А.А., Васильева М.А. Анализ мирового опыта развития высокоскоростного железнодорожного транспорта // Молодой ученый. 2016. № 6 (110). С. 114–117.
4. СТН Ц-01–95. Железные дороги колеи 1 520 мм. Утв. МПС РФ 25.09.95. М.: МПС РФ, 1995. 86 с.
5. Карасёв С.В., Зарубина Т.Д. Особенности организации скоростного движения с учетом использования имеющейся железнодорожной инфраструктуры // Политранспортные системы: Материалы VIII Международ. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. С. 61–67.
6. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. Сооружения и устройства. Подвижной состав. Организация перевозок. (Обобщение отечественного и зарубежного опыта) / А.Ф. Алимов, В.Г. Ананьев, Т.А. Белаш и др.; Под общ. ред. В.И. Ковалева. СПб., 2003. Т. 2. 447 с.
7. Калидова А.Д. Особенности определения эффективности организации высокоскоростного движения // Наука XXI века: теория, практика и перспективы: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2015. С. 40–43.
8. Киселев И.П., Сотников Е. А., Суходоев В. С. Высокоскоростные железные дороги. СПб., 2001. 60 с.
9. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: Учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.Д. Кузьмича. М., 2005. 448 с.
10. Калидова А.Д. Варианты организации скоростного и высокоскоростного движения поездов на территориях с низкой плотностью населения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 260–263.

S.V. Karasev, A.D. Kalidova

Use of Kinetic Acceleration and Deceleration Railroad Sections in Very High-Speed and High-Speed Railway Lines

Abstract. One of the main obstacles in the way toward the development of high-speed railways is the high cost of construction and use of the infrastructure of specialized railway lines as this high cost exerts a negative impact on the payback period. A common feature of all countries in which high-speed railways are used is their high population density that permits paying back considerable investments in infrastructure due to the intense very high-speed and high-speed traffic. In the case of a low population density, insignificant passenger traffic, and/or a long railway-line length (all these factors are typical of the most part of Russia's territory), the need for reducing necessary investments comes to the forefront, in particular, through justifying the rational route parameters.

In the present article, an idea to design an energy-efficient longitudinal profile of a high-speed railway line involving acceleration and deceleration railroad sections provided near stopping points and, also, route elements with train speed limitations, is reported. An approximate analytical method for calculating the energy saving of very high-speed (high-speed) trains due to the proper design of kinetic railroad sections is proposed. Calculations aimed at evaluation of the change of train's kinetic energy and speed due to the transformation of train's kinetic into potential energy over the properly designed longitudinal profile of the railroad route are performed. Dependences of energy saving and speed losses versus the length and grade of kinetic railroad sections were obtained.

Key words: *high-speed railways; energy efficiency; kinetic energy; train motion energy; deceleration and acceleration sections; kinetic sections; longitudinal profile.*

Карасёв Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и узлы» СГУПС. E-mail: gdsu@rambler.ru

Калидова Александра Дмитриевна – аспирант, преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и узлы» СГУПС. E-mail: alexsandra_kd@bk.ru