

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 656.072

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕПОГАШЕННОГО УСКОРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, старш. преп. Т. А. Дубровская

### АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕПОГАШЕНОГО ПРИСКОРЕННЯ НА ШВИДКІСТЬ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, старш. викл. Т. О. Дубровська

### ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AN ABSOLUTE ACCELERATION ON THE SPEED OF MOVEMENT OF PASSENGER TRAINS

PhD (Tech.) P. V. Kovtun, senior lecturer T. A. Dubrovskaya

*Повышение скоростей движения на существующих линиях при минимальных затратах – одна из основных задач на сегодняшний день на Белорусской железной дороге. Ближайшая скоростная перспектива – 160 км/ч. Зачастую существующие кривые малых радиусов сдерживают увеличение скоростей движения пассажирских поездов. Одним из основных критериев определения скорости движения в кривых является непогашенное ускорение –  $a_{нп}$ , м/с. Для пассажирских поездов  $a_{нп}$  принято равным  $0,7 \text{ м/с}^2$ . Этот критерий является характеристикой плавности хода и условием комфортабельности езды. Поднять скорость в кривых можно несколькими способами, например, увеличив возвышение наружного рельса, повысив норму непогашенного ускорения и т. д. Первый вариант требует удлинения переходных кривых и переукладки пути, что дорого и не всегда возможно осуществить. В частности, это трудно сделать на линиях с интенсивными грузоперевозками. Вторым вариантом решения проблемы имеет гораздо больше возможностей быть реализованным. В статье рассмотрен один из вариантов увеличения скорости прохождения кривых за счет увеличения допустимого предела непогашенного ускорения до  $0,9 \text{ м/с}^2$ . Экспериментальными исследованиями установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения величиной до  $0,9 \text{ м/с}^2$  включительно большинство людей переносит удовлетворительно, при этом скорости движения пассажирских поездов можно поднять на 10-20 км/ч в зависимости от радиуса криволинейного участка пути.*

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, повышение скорости, непогашенное ускорение, возвышение наружного рельса, круговые кривые, реконструкция.

*Підвищення швидкостей руху на наявних лініях при мінімальних витратах – одне з нагальних завдань на Білоруській залізниці. Найближча швидкісна перспектива – 160 км/год. Найчастіше наявні криві малих радіусів стримують збільшення швидкості пасажирських поїздів. Одним з основних критеріїв визначення швидкості руху в кривих є непогашене прискорення –  $a_{нп}$ , м/с. Для пасажирських поїздів  $a_{нп}$  обирається  $0,7 \text{ м/с}^2$ . Цей критерій є характеристикою плавності ходу й умовою комфортабельності їзди. Підняти швидкість у*

кривих можна двома способами: збільшити піднесення зовнішньої рейки або підвищити норму непогашеного прискорення. Перший варіант вимагає подовження перехідних кривих і переукладання колії, що дорого й не завжди можливо здійснити. Це важко зробити на лініях з інтенсивними вантажоперевезеннями. Другий варіант вирішення проблеми має набагато більше можливостей бути реалізованим. У статті розглянуто один із варіантів збільшення швидкості проходження кривих завдяки підвищенню допустимої межі непогашеного прискорення до  $0,9 \text{ м/с}^2$ . Експериментальними дослідженнями встановлено, що тривала та повторна дія непогашеного відцентрового прискорення величиною до  $0,9 \text{ м/с}^2$  включно більшість людей переносить задовільно, при цьому швидкості руху пасажирських поїздів можна збільшити на 10-20 км/год залежно від радіуса.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, підвищення швидкості, непогашене прискорення, піднесення зовнішньої рейки, кругові криві, реконструкція.

*Increasing the speed of traffic on existing lines with minimal costs is one of the main tasks that exist today on the Belarusian Railways. The nearest high-speed prospect is 160 km/h. Often the existing curves of small radii restrain the increase in the speed of passenger trains. As one of the main criteria for determining the speed of motion in the curves is the unrestricted acceleration –  $a_{aa}$ , m/s. For passenger trains  $a_{aa}$  is assumed equal to  $0.7 \text{ м/с}^2$ . This criterion is a characteristic of the smooth running and the condition of riding comfort. You can increase the speed in curves in several ways: for example, by increasing the elevation of the outer rail, by raising the rate of unprecedented acceleration, etc. The first option requires lengthening the transition curves and re-laying the track, which is expensive and not always possible. In particular, it is difficult to do on lines with intensive cargo transportation. The second solution to the problem has much more opportunities to be realized. The article considers one of the options for increasing the speed of passing curves by increasing the permissible limit of the unrestricted acceleration to  $0.9 \text{ м/с}^2$ . Experimental studies have established that the long-term and repeated impact of an unprecedented centrifugal acceleration up to  $0.9 \text{ м/с}^2$  inclusive, most people tolerate satisfactorily, while the speed of passenger trains can be increased by 10-20 km/h depending on from the radius of the curvilinear section of the path. Consequently, the rate of passage of existing curves will change upwards with a minimum investment. In this case, a change in the magnitude of the outstanding acceleration in a large direction should not be accompanied by the deterioration of the passengers. If this condition is met, there is an adjustment of the scientific and technical documentation existing on the Belarusian Railways.*

**Keywords:** railway transport, speed increase, outstanding acceleration, elevation of the outer rail, circular curves, reconstruction.

**Введение.** Максимальная скорость движения поезда в кривой зависит от центробежных сил во взаимодействии подвижного состава и пути, которые в свою очередь определяют устойчивость подвижного состава против опрокидывания, поперечную нагрузку на путь, уровень комфорта для пассажиров и сохранность груза. Первые два критерия непосредственно относятся к безопасности движения поездов, третий и четвертый – к качеству пассажирских и грузовых перевозок.

Для нейтрализации центробежной силы в кривых наружный рельс укладывают с некоторым возвышением относительно внутреннего.

Центробежная сила, действующая в кривой, за счет возвышения наружного рельса может быть погашена полностью, частично или даже чрезмерно (при этом результирующая сила действует в сторону внутреннего рельса). На практике для таких случаев в зависимости от степени компенсации центробежной силы

используют понятия достаточного, недостаточного и избыточного возвышения.

Зная о воздействии центробежной силы, учитывая накопленный опыт, устанавливаются допустимые значения на геометрические параметры пути, в частности, на максимально допустимую величину возвышения наружного рельса в кривых и предельно допустимое значение непогашенного ускорения, при которых обеспечиваются достаточные уровень комфорта для пассажиров и сохранность грузов.

Исходя из этого, при повышении скорости движения поездов на существующих линиях можно выбрать одно из двух решений: увеличить недостаток возвышения наружного рельса или увеличить значение непогашенного ускорения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Проблемы увеличения скорости на существующих линиях без реконструкции или при минимальном переустройстве плана линии занимались многие известные ученые: Г. М. Шахуняц [1], Н. И. Карпущенко [2], Н. Б. Курган [3], Д. Н. Курган [4], И. В. Смелянский [5], А. М. Патласов [6] и др. [9, 10].

Общие тенденции анализа последних исследований сводятся к тому, что значительное повышение скоростей движения пассажирских поездов будет носить при определенных условиях и коммерческий интерес для отрасли, так как железные дороги смогут предоставлять пассажирам конкурентоспособную по отношению к авиа- и автотранспорту услугу.

По существующим прогнозам, скоростное движение в ближайшем будущем может охватить значительно более широкий сектор пассажирских перевозок, чем высокоскоростное, так как его организация не связана со строительством новой линии, хотя и требует существенных затрат на реконструкцию.

**Определение цели и задачи исследования.** Проблема повышения скорости движения в кривых при существующих радиусах весьма актуальна, но имеет и свои сложности. Обеспечить не только скорости движения, одинаковый износ рельсов, но и комфортабельность и безопасность пассажиров – вот одна из основных проблема в области железнодорожных перевозок.

Целью данного исследования является повышение скоростей движения поездов на существующих линиях в круговых кривых без переустройства плана. Для достижения цели изменяется предельная величина непогашенного ускорения при движении пассажирских поездов с  $0,7 \text{ м/с}^2$  до  $0,9 \text{ м/с}^2$  при безусловном соблюдении требований по безопасности и комфортабельности движения и др. Основная задача данной статьи – рассмотреть возможность увеличения скоростей движения поездов на существующих железнодорожных линиях при минимальных капиталовложениях.

**Основная часть.** Экспериментальными исследованиями установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения, величиной до  $0,9 \text{ м/с}^2$  включительно большинство людей переносит удовлетворительно [7]. Согласно исследованиям ВНИИЖТа, ощущения укачивания, подташнивания и головокружения у пассажиров при поперечном непогашенном ускорении  $0,9 \text{ м/с}^2$  увеличиваются на 0,05 услов. ед. (с 1,62 до 1,67 услов. ед.) и находятся в допуске (рис. 1). Непогашенное центробежное ускорение, равное  $1 \text{ м/с}^2$ , переносится удовлетворительно при немногочисленных и непродолжительных воздействиях.

Общее функциональное состояние и работоспособность локомотивных бригад при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения  $0,9 \text{ м/с}^2$  находится в оптимальных пределах допуска (от 71 до 118 услов. ед.) и равняется

118 услов. ед. (рис. 2). Таким образом, увеличение непогашенного ускорения до  $0,9 \text{ м/с}^2$  не окажет существенного влияния

на организм пассажиров, но может существенно сэкономить время в пути за счет более быстрого прохождения кривых.

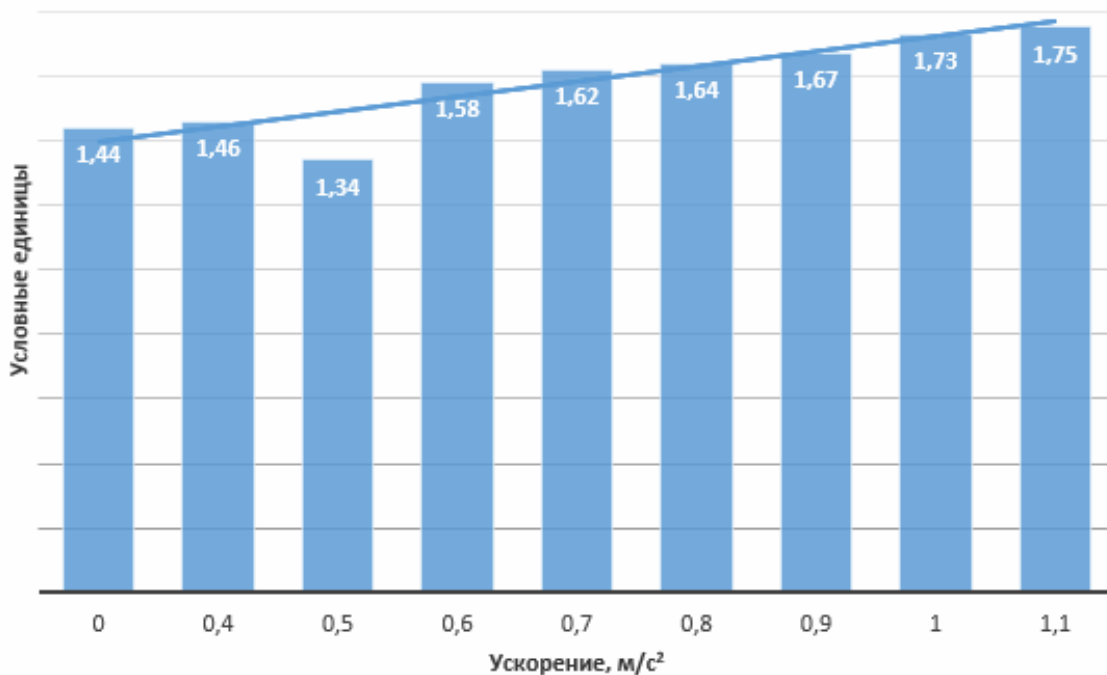


Рис. 1. Анализ общего функционального состояния у пассажиров при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения

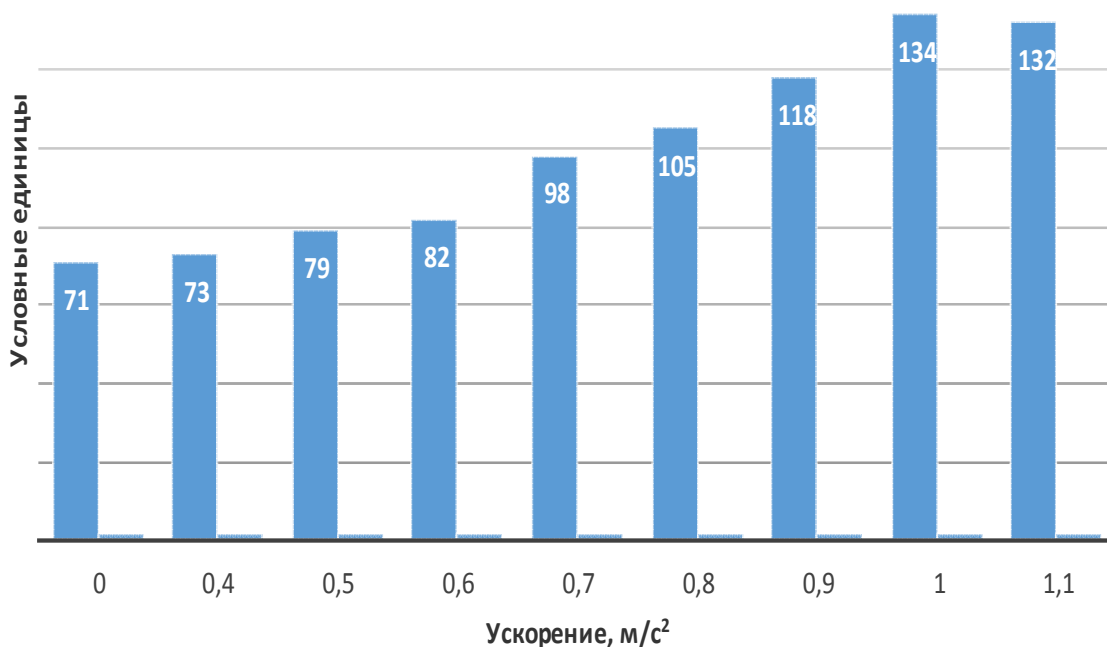


Рис. 2. Анализ общего функционального состояния и работоспособности локомотивных бригад при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения

Полученные данные позволяют выполнять расчеты при непогашенном ускорении, равном  $0,9 \text{ м/с}^2$ , и проанализировать влияние увеличения непогашенного ускорения на скорости прохождения пассажирским поездом кривых различных радиусов.

Исходя из вышесказанного, необходимо рассмотреть, как влияет изменение величины непогашенного ускорения в кривых до  $0,9 \text{ м/с}^2$  на скорость прохождения и радиус кривой.

Согласно СТП [8], непогашенное ускорение в кривых определяется по формуле

$$a_{\text{нп}} = \frac{v_{\text{max}}^2}{3,6R} - \frac{g}{S} h, \quad (1)$$

где  $v_{\text{max}}$  – максимальная скорость движения по данной кривой, км/ч;

$R$  – радиус кривой, м;

$g$  – ускорение свободного падения ( $9,81$ ),  $\text{м/с}^2$ ;

$S$  – ширина между осями рельсов ( $1600$ ), мм;

$h$  – возвышение наружного рельса, мм.

Тогда путем преобразований  $h$  можно выразить как

$$h = 12,5 \frac{v_{\text{max}}^2}{3,6R} - \frac{g}{S} h, \quad (2)$$

В качестве опытного участка рассматривается один из перегонов Белорусской железной дороги длиной около 10 км, на котором имеется несколько кривых малого и среднего радиусов ( $R_1=580 \text{ м}$ ;  $R_2=620 \text{ м}$ ;  $R_3=700 \text{ м}$ ;  $R_4=720 \text{ м}$ ). Формула  $v=4,6 \sqrt{R}$  показывает, какую максимальную скорость теоретически может пропустить данный криволинейный участок пути. В практике, обычно, все скорости по кривым ограничиваются приказом начальника дороги и зависят от многих других факторов (наличия населенного пункта, состояния верхнего строения пути и т. д.). Реконструкция плана линии заключается в увеличении радиусов кривых и их переустройстве. Данное мероприятие длительное и дорогостоящее.

С целью увеличения скоростей на существующих железнодорожных линиях (без изменения геометрии плана) на первом этапе рассчитывается возвышение наружного рельса, исходя из заданных радиусов и скоростей движения поездов по приказу начальника дороги (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость  $h = f(R)$  при  $a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$

Радиус $R$ , м	580	620	700	720
Максимальная скорость движения $v_{\text{max}}$ , км/ч	75	80	90	95
Возвышение наружного рельса $h$ , мм	7	15	31	43

По полученным значениям строится график зависимости  $h = f(R)$  при  $a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$  (рис. 3).

Из формулы (2) вычисляется значение скорости

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{(h + 163a_{\text{нп}})R}{12,5}}. \quad (3)$$

Увеличив в формуле (3) величину непогашенного ускорения с  $0,7 \text{ м/с}^2$  до  $a_{\text{нп}}=0,8 \div 0,9 \text{ м/с}^2$  на втором этапе, можно получить новые значения скоростей (табл. 2, 3).

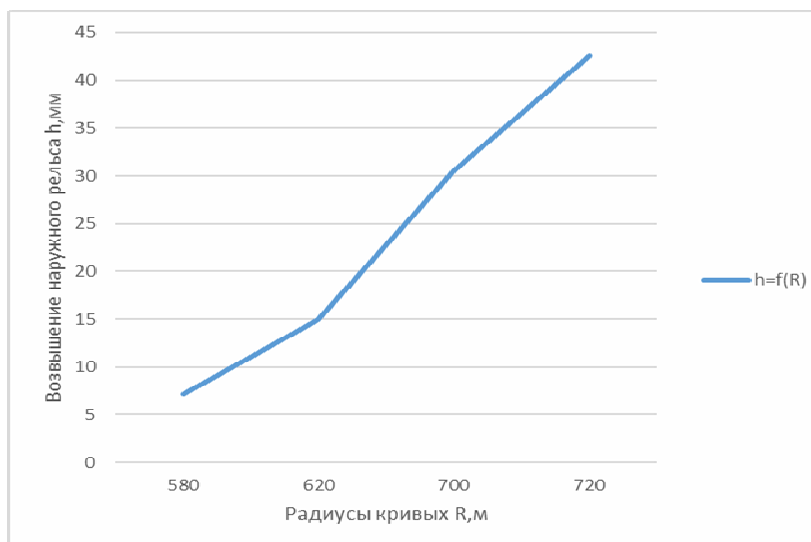


Рис. 3. Графік залежності підвищення зовнішнього рейса від радіуса кривої

Таблиця 2

Залежність  $V_{\max} = f(a_{\text{нп}})$  при  $a_{\text{нп}}=0,8 \text{ м/с}^2$

Радіус $R$ , м	580	620	700	720
Підвищення зовнішнього рейса $h$ , мм	7	15	31	43
Максимальна швидкість руху $v_{\max}$ , км/ч	80	85	95	100

Таблиця 3

Залежність  $v_{\max} = f(a_{\text{нп}})$  при  $a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$

Радіус $R$ , м	580	620	700	720
Підвищення зовнішнього рейса $h$ , мм	7	15	31	43
Максимальна швидкість руху $v_{\max}$ , км/ч	84	90	100	104

Отримані значення швидкостей при постійному радіусі, підвищенні зовнішнього рейса і різному непогашеному

ускоренні сведені в табл. 4, по результатам которой построено графік залежності  $v_{\max} = f(a_{\text{нп}})$  (рис. 4).

Таблиця 4

Швидкість проходження кривих при різному непогашеному ускоренні

Радіус, м	580	620	700	720
Непогашене ускорення, $\text{м/с}^2$				
0,7	75	80	90	95
0,8	80	85	95	100
0,9	84	90	100	104

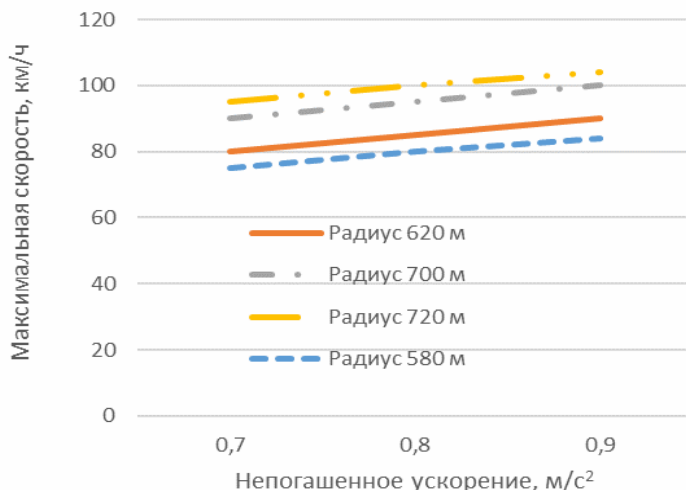


Рис. 4. Графік залежності максимальної швидкості руху від величини непогашеного прискорення

Из графика видно, что увеличение непогашенного ускорения до  $0,9 \text{ м/с}^2$  ведет к повышению скорости прохождения криволинейных участков пути в среднем на 15 %, что позволит существенно сэкономить финансы без переустройства плана линии. При этом, увеличивая значение

непогашенного ускорения до  $0,9 \text{ м/с}^2$ , можно уменьшить высоту возвышения наружного рельса в кривой, без изменения скорости прохождения пассажирским поездом криволинейного участка пути (при условии  $h > 0$ ) (табл. 5).

Таблица 5

Изменение величины возвышения наружного рельса при различном непогашенном ускорении

Непогашенное ускорение, $\text{м/с}^2$	Радіус, м			
	580	620	700	720
	Скорость движения, разрешенная по приказу, $v_{\text{max}}$ , км/ч (исходя из $a_{\text{нп}} = 0,7 \text{ м/с}^2$ )			
	75	80	90	95
Расчетные значения возвышения наружного рельса $h$ , мм				
0,7	7	15	31	43
0,8	-9*	-1*	14	26
0,9	-25*	-17*	-2*	10

Примечание. \*Имеется резерв повышения скорости движения пассажирских поездов за счет увеличения значения допускаемого непогашенного ускорения  $a_{\text{нп}}$ .

Например, при установленных значениях  $h = 7 \text{ мм}$ ,  $R = 580 \text{ м}$  и  $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$  можно реализовать скорость  $v'_{\text{max}} = 84 \text{ км/ч}$  против  $v_{\text{max}} = 75 \text{ км/ч}$  (при  $a_{\text{нп}} = 0,7 \text{ м/с}^2$ ),

что подтверждает вывод об увеличении скоростей в среднем на 15 %.

В случае реконструкции железнодорожной линии с учетом возможного

изменения геометрии плана значение радиуса определяется из формулы

$$R = \frac{12,5v_{\max}^2}{h + 163[a_{\text{нп}}]} \quad (4)$$

По формуле (4) рассчитываются значения радиусов при постоянных показателях скорости, возвышения и разном непогашенном ускорении. Полученные данные сводятся в табл. 6 и строится график  $R = f(a_{\text{нп}})$  (рис. 5).

Таблица 6

Зависимость величины радиуса кривой от значения непогашенного ускорения

Скорость движения $v$ , км/ч	Возвышение наружного рельса $h$ , мм	Непогашенное ускорение $[a_{\text{нп}}]$ , м/с <sup>2</sup>		
		0,7	0,8	0,9
84	7	735	649	580
91	15	777	690	620
100	31	858	771	700
104	43	870	788	720

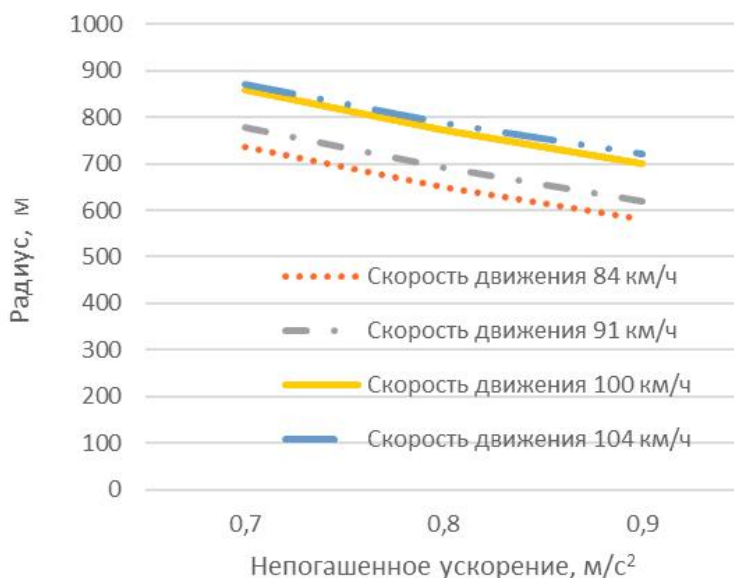


Рис. 5. График зависимости радиуса кривой от величины непогашенного ускорения

Из табл. 6 и рис. 5 видно, что при увеличении границы допускаемого значения непогашенного ускорения реализовать максимальную скорость движения пассажирских поездов при существующем возвышении наружного рельса можно на кривых и меньшего радиуса.

В настоящее время в связи с тем, что на участке Красное-Минск-Брест Белорусской железной дороги транзитом

проходят поезда российского формирования «Стриж», состоящие из вагонов типа Talgo с наклоном кузова, кафедрой «ПСиЭТО» БелГУТа проводятся исследования по определению влияния увеличенного допускаемого значения непогашенного ускорения  $[a_{\text{нп}}]$  до 1,1 м/с<sup>2</sup>.

**Выводы.** Проведенные расчеты подтверждают, что за счет увеличения дополнительного непогашенного ускорения



с 0,7 до 0,9 м/с<sup>2</sup> можно в зависимости от радиуса криволинейного участка повысить скорости в кривых участках пути на 10–20 км/ч. Таким образом, скорости движения пассажирских поездов при прохождении существующих кривых, без изменения возвышения наружного рельса при минимальных капиталовложениях можно изменять только за счёт увеличения допускаемого значения непогашенного

ускорения. При этом, безусловно, должны соблюдаться требования по технике безопасности и комфортабельность езды пассажиров. Следовательно, существующая на Белорусской железной дороге научно-техническая документация нуждается в корректировке в соответствии с общепринятым значением непогашенного ускорения  $a_{нп}$ .

### Список использованных источников

1. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст]: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Г. М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1969. – 536 с.
2. Карпущенко, Н. И. Возвышение наружного рельса и допускаемые скорости движения поездов в кривых [Текст] / Н. И. Карпущенко // Проблемы повышения скоростей движения поездов на Транссибирской магистрали: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1999. – С. 7-15.
3. Курган, Н. Б. Определение объемов работ для снятия ограничений скорости, связанных с планом линии [Текст] / Н. Б. Курган, Н. П. Хмелевская, С. Ю. Байдак // Сб. науч. трудов Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск: Из-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 52-62.
4. Курган, Д. Н. Методология расчетов железнодорожной колеи при взаимодействии со скоростным подвижным составом [Текст]: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Д. Н. Курган. – Днепропетровск, 2017. – 35 с.
5. Смелянский, И. В. Совершенствование нормативов непогашенного ускорения и его приращения для современного подвижного состава при скоростном движении [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог / И. В. Смелянский. – М.: МИИТ, 2008. – 208 с.
6. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії [Текст]: ЦП-0236. – Затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 №778-Ц. – К., 2010. – 52 с.
7. Эффект ускорения [Электронный ресурс] // газета «Гудок»; АО «Издательский дом «Гудок». – 2012. – Режим доступа: <http://www.gudok.ru/newspaper/?archive=2012.05.15>.
8. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ. Стандарт организации [Текст]: СТП 09150.56.010-2005. – Введ. 01.07.2006. – Минск, 2006. – 284 с.
9. Leaflet 513. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Traction and Rilling Stock Committee. Paris. 1994.
10. Sirong, Yi. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment: Theory and Practice [Text] / Yi Sirong // Technology & Engineering. – Elsevier Science, 2017. – 324 p.

Ковтун Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.

Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.

Дубровская Татьяна Алексеевна, старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.

Тел.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Ковтун Павло Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.

Дубровська Тетяна Олексіївна, старший викладач кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Kovtun Pavel Vladimirovich, PhD (Tech.), associate professor, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport. Tel.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.  
Dubrovskaya Tatyana Alekseevna, senior lecturer, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State Transport University. Tel.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Статтю прийнято 25.10.2018 р.