

УДК 629.4.016.12:519.2

С. В. НЕГРЕЙ, зам. начальника Управления внешнеэкономических связей, Министерство транспорта и коммуникаций, г. Минск

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ В ТЕОРИИ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

Рассматриваются вопросы использования вероятностных моделей в теории перевозочного процесса. Показано, что многие параметры перевозочного процесса, влияющие на основное удельное сопротивление движению, носят вероятностный характер. Для расчета основного удельного сопротивления предлагаются аналитические зависимости, которые учитывают вероятностный характер осевой нагрузки. Исследована величина относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления при разных законах распределения осевой нагрузки.

Одной из наиболее важных теорий, которая используется практически на всех этапах исследования перевозочного процесса, а также для проектирования инфраструктуры и подвижного состава, расчета расхода электроэнергии, топлива, смазки, воды, является теория тяговых расчетов, которая, в частности, на железнодорожном транспорте положена в основу «Правил тяговых расчетов для поездной работы» (ПТР).

Современная теория тяговых расчетов базируется на детерминированной концепции, которая сводится к использованию зависимостей типа [1,3]

$$y = f(x_i), \quad (1)$$

где x_i – факторы, влияние которых на величину y может быть оценено со сколь угодно малой погрешностью, а сами факторы можно точно измерить.

Однако в реальных условиях эксплуатации, которые отличаются определенным уровнем неопределенности, не всегда удается не только точно измерить физические параметры модели, но и нельзя сказать, что они сохранят свои значения неизменными. Таким образом, в общем виде математическая модель должна быть записана в виде

$$y = f(x_i, \alpha, \beta, \gamma, \dots), \quad (2)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – параметры, величина которых случайна и может быть установлена только с некоторой вероятностью P или, вообще, задана в некотором интервале $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$.

Основное удельное сопротивление движению вагонов на роликовых подшипниках ($g > 6$ т) определяется по следующей принципиальной зависимости:

$$\omega''_0 = A + \frac{B + Cv + Dv^2}{g_0}, \quad (3)$$

где A, B, C, D – эмпирические коэффициенты, которые зависят от типа верхнего строения пути; g_0 – масса, приходящаяся на ось колесной пары, т.

Для порожних вагонов на роликовых подшипниках ($g_0 \leq 6$ т)

$$\omega''_{on} = B' + C'v + D'v^2, \quad (4)$$

где B', C', D' – эмпирические коэффициенты, которые устанавливаются опытным путем.

Однако расчет основного удельного сопротивления по формулам (3)–(4) не учитывает случайный характер колебаний осевой нагрузки. Исследования, выполненные для различных участков Белорусской железной дороги, показали, что колебания осевой нагрузки описываются различными законами распределения. Поэтому расчет основного удельного сопротивления необходимо вести по следующей принципиальной зависимости:

$$\tilde{\omega}''_0 = \int_{g_0^{\min}}^{g_0^{\max}} \omega''_0 P(g_0) dg_0, \quad (5)$$

где $P(g_0)$ – вероятность появления в поезде вагонов с нагрузкой g_0 .

Например, для четырехосных вагонов на роликовых подшипниках и звеньевого пути

$$\tilde{\omega}''_0 = \int_{g_0^{\min}}^{g_0^{\max}} \left(0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{g_0} \right) P(g_0) dg_0. \quad (6)$$

Учитывая, что основное удельное сопротивление движению подвижного состава нелинейно зависит от величины осевой нагрузки, а темп изменения ω''_0 в зоне $g_0^{\min} - \bar{g}_0$ гораздо выше, чем в зоне $\bar{g}_0 - g_0^{\max}$, то на действительную величину ω''_0 будет оказывать влияние закон распределения колебаний осевой нагрузки.

На бесстыковом пути основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов будет определяться по формуле (четыреосные вагоны на роликовых подшипниках с ($g_0 > 6$ т)

$$\tilde{\omega}''_0 = \int_{g_0^{\min}}^{g_0^{\max}} \left(0,7 + \frac{3 + 0,09v + 0,002v^2}{g_0} \right) P(g_0) dg_0. \quad (7)$$

Исследование колебаний осевой нагрузки на участках железных дорог стран СНГ показало, что

наиболее часто они описываются равномерным, экспоненциальным, нормальным, логнормальным, эрланговским x_n -распределением. В отдельных случаях невозможно найти аналитическое описание закона распределения колебаний осевой нагрузки. Для таких случаев получить обобщающие аналитические решения затруднительно, и здесь обработка накопленной информации возможна только с использованием обучающихся систем.

Наиболее просто получить закономерности для расчета основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов в условиях колебаний осевой нагрузки возможно для равномерного закона распределения, который имеет вид

$$P(g_0) = \begin{cases} 0 & g_0 < a; \\ C & a \leq g_0 \leq b; \\ 0 & g_0 > b. \end{cases} \quad (8)$$

$$P(g_0) \geq 0, C > 0.$$

Из условия

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(g_0) dg_0 = 1$$

вытекает

$$\int_{g_{\min}}^{g_{\max}} C dg_0 = 1; C(g_{\max} - g_{\min}) = 1; C = \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}},$$

где g_{\max} , g_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения осевой нагрузки.

Таким образом,

$$P(g_0) = \begin{cases} 0 & \text{при } g_0 < g_{\min}; \\ \frac{1}{b-a} & \text{при } g_{\min} \leq g_0 \leq g_{\max}; \\ 0 & \text{при } g_0 > g_{\max}; \end{cases} \quad (9)$$

Очевидно, что математическое ожидание случайной величины g_0

$$M[g_0] = \int_{-\infty}^{\infty} g_0 P(g_0) dg_0 = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{g_0}{b-a} dg_0 = \frac{g_{\min} + g_{\max}}{2}. \quad (10)$$

Дисперсия величины g_0

$$D[g_0] = \int_{-\infty}^{\infty} g_0^2 P(g_0) dg_0 - (M[g_0])^2 = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{g_0^2}{g_{\max} - g_{\min}} dg_0 - \frac{(g_{\min} + g_{\max})^2}{4} = \frac{(g_{\max} - g_{\min})^2}{12}. \quad (11)$$

Коэффициент асимметрии

$$A[g_0] = \frac{\int_a^b (\omega_0'' - \omega_0''[g_0])^3 \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}} dg_0}{\left(\frac{g_{\max} - g_{\min}}{12}\right)^3} = 0. \quad (12)$$

Для равномерного закона распределения колебаний осевой нагрузки легко получить в явном виде выражение для определения $\tilde{\omega}_0''$.

Подставив в (5) значение $P(g_0)$ из (9), получим для четырехосных вагонов на звеньевом пути

$$\tilde{\omega}_0'' = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \left(0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{g_0}\right) \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}} dg_0. \quad (13)$$

Выполнив преобразования, получим

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_0'' &= \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}} \left(0,7 \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} dx + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{dx}{x}\right) = \\ &= \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}} \left(0,7x \Big|_{g_{\min}}^{g_{\max}} + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) \ln x \Big|_{g_{\min}}^{g_{\max}}\right) = \\ &= \frac{1}{g_{\max} - g_{\min}} \left(0,7(g_{\max} - g_{\min}) + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) \ln \frac{g_{\max}}{g_{\min}}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

После упрощения (14) окончательно будем иметь выражение для расчета основного удельного сопротивления для равномерного закона распределения колебаний осевой нагрузки

$$\tilde{\omega}_0'' = 0,7 + \frac{(3 + 0,1v + 0,0025v^2)(\ln g_{\max} - \ln g_{\min})}{g_{\max} - g_{\min}}. \quad (15)$$

Используя (15), определим действительное значение основного удельного сопротивления для случая $v = 90$ км/ч, $g_{\max} = 20$ т/ось, $g_{\min} = 6$ т/ось:

$$\tilde{\omega}_0'' = 0,7 + \frac{(3 + 0,1 \cdot 90 + 0,0025 \cdot 90^2)(\ln 20 - \ln 6)}{20 - 6} = 3,47 \text{ Н/кН.}$$

Относительная ошибка расчета ω_0 для рассмотренных условий

$$\Delta = \frac{(\tilde{\omega}_0'' - \omega_0) \cdot 100}{\omega_0} = \frac{(3,47 - 3,18) \cdot 100}{3,18} = 9,1 \%. \quad (16)$$

Для бесстыкового пути по аналогии с формулой (15)

$$\tilde{\omega}_0'' = 0,7 + \frac{(3 + 0,09v + 0,002v^2)(\ln g_{\max} - \ln g_{\min})}{g_{\max} - g_{\min}}. \quad (16)$$

Используя выражения (15) и (16), строим графики зависимости $\Delta = f(v, \bar{g}, g_{\max} - g_{\min})$ для бесстыкового (рисунки 1, 2) и звеньевого (рисунки 3, 4) путей.

Анализ рисунков 1–4 позволяет сделать следующие выводы:

1 Колебания осевой нагрузки, описываемые равномерным законом распределения, оказывают существенное влияние на величину основного удельного сопротивления, и на реальных железнодорожных участках будет наблюдаться перерасход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

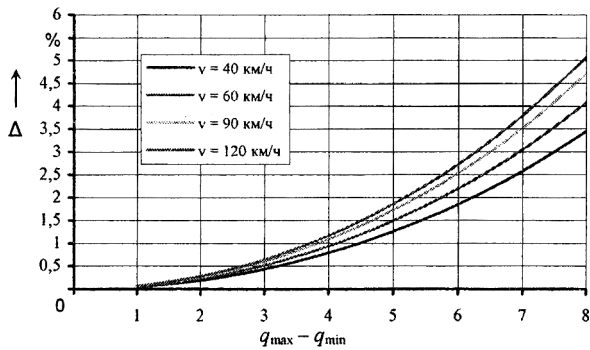


Рисунок 1 – Изменение относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления движению при равномерном законе распределения колебаний осевой нагрузки (грузовые вагоны, бесстыковой путь, $q = 10$ т)

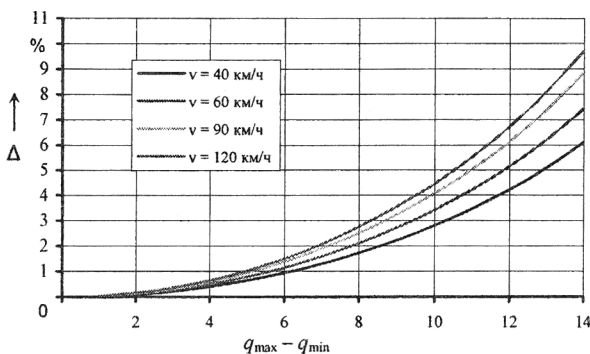


Рисунок 2 – Изменение относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления движению при равномерном законе распределения колебаний осевой нагрузки (грузовые вагоны, бесстыковой путь, $q = 13$ т)

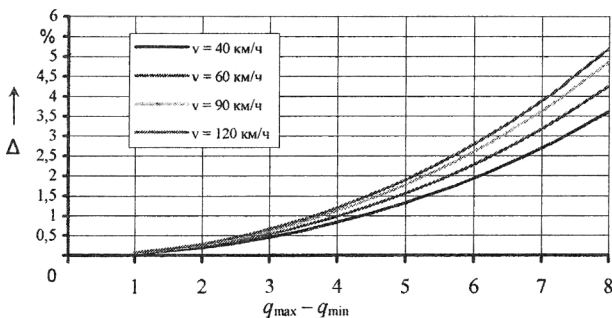


Рисунок 3 – Изменение относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления движению при равномерном законе распределения колебаний осевой нагрузки (грузовые вагоны, звеньевой путь, $\bar{g}_0 = 10$ т)

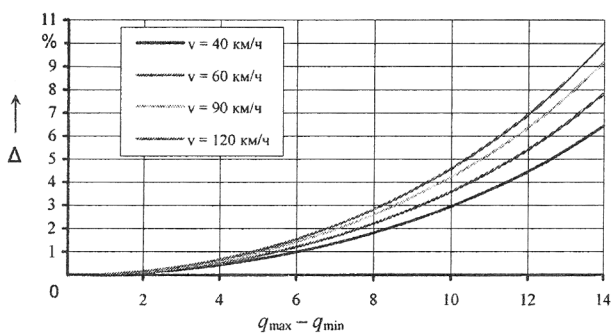


Рисунок 4 – Изменение относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления движению при равномерном законе распределения колебаний осевой нагрузки (грузовые вагоны, звеньевой путь, $\bar{g}_0 = 13$ т)

2 С ростом скорости движения грузовых поездов влияние колебаний осевой нагрузки на основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов увеличивается. Повышение скорости движения поездов с 40 до 90 км/ч (звеньевой путь) увеличивает ошибку расчета основного удельного сопротивления на 1,5–2,5 %.

3 Сокращение неопределенности колебаний осевой нагрузки существенно уменьшает ошибку расчета основного удельного сопротивления, а в реальных условиях эксплуатации способствует экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

4 Железнодорожные участки, где уложен бесстыковой путь, менее чувствительны к влиянию колебаний осевой нагрузки на основное удельное сопротивление движению поездов и способствуют экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

Если колебания осевой нагрузки описываются показательным (экспоненциальным) распределением, то плотность вероятности

$$P(g_0) = \begin{cases} 0 & g_0 < 0; \\ \lambda e^{-\lambda g_0} & g_0 \geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Легко показать, что для случая, когда g_0 распределено по показательному (экспоненциальному) распределению, то

$$M[g_0] = \frac{1}{\lambda}; \quad D[g_0] = \frac{1}{\lambda^2}; \quad \sigma[g_0] = \frac{1}{\lambda}. \quad (18)$$

Очевидно, что

$$\lambda = \frac{1}{\bar{g}_0}, \quad (19)$$

где \bar{g}_0 – среднее значение массы, приходящейся на ось колесной пары.

Для показательного (экспоненциального) распределения колебаний осевой нагрузки коэффициент асимметрии $A[g_0]$ равен 2 и значительно больше, чем для равномерного закона.

Для экспоненциального закона распределения колебаний осевой нагрузки основное удельное сопротивление движению груженых вагонов

$$\tilde{\omega}_{o3}'' = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \left(A + \frac{B + Cv + Dv^2}{g_0} \right) \lambda e^{-\lambda g_0} dg_0. \quad (20)$$

Преобразуя (20), получим

$$\tilde{\omega}_{o3}'' = A\lambda \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} e^{-\lambda g_0} dg_0 + (B + Cv + Dv^2)\lambda \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{1}{g_0} e^{-\lambda g_0} dg_0. \quad (21)$$

Упростив (21), будем иметь

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{03}'' &= -A\lambda \Big|_{g_{\min}}^{g_{\max}} + \\ &+ (B + Cv + Dv^2)\lambda \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{1}{g_0} e^{-\lambda g_0} dg_0. \end{aligned} \quad (22)$$

Для расчета определенного интеграла во второй части выражения (22) разложим выражение $e^{-\lambda g_0}$ в ряд

$$e^{-\lambda g_0} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \lambda^n g_0^n}{n!}. \quad (23)$$

Определенный интеграл

$$Z = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{1}{g_0} \left(1 - \lambda g_0 + \frac{\lambda^2 g_0^2}{2!} - \frac{\lambda^3 g_0^3}{3!} + \frac{\lambda^4 g_0^4}{4!} - \dots \right) dx \quad (24)$$

запишем в виде

$$Z = \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \left(\frac{1}{g_0} - \lambda + \frac{\lambda^2 g_0}{2!} - \frac{\lambda^3 g_0^2}{3!} + \frac{\lambda^4 g_0^3}{4!} - \dots \right) dg_0. \quad (25)$$

Решая (25), получим

$$\begin{aligned} Z &= \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \frac{dg_0}{g_0} - \lambda \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} dg_0 + \frac{\lambda^2}{2!} \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} g_0 dg_0 - \\ &- \frac{\lambda^3}{3!} \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} g_0^2 dg_0 + \frac{\lambda^4}{4!} \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} g_0^3 dg_0. \end{aligned} \quad (26)$$

Из (26) следует

$$Z = \ln \frac{g_{\max}}{g_{\min}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \lambda^n}{n!} \cdot \frac{g_{\max}^n - g_{\min}^n}{n}. \quad (27)$$

Подставив (27) в (22), окончательно получим

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{03}'' &= A(e^{-\lambda g_{\min}} - e^{-\lambda g_{\max}}) + (B + Cv + Dv^2)\lambda \times \\ &\times \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \lambda^n}{n!} \cdot \frac{g_{\max}^n - g_{\min}^n}{n} + \ln \frac{g_{\max}}{g_{\min}} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Преобразуя (28), определим действительное значение основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов при экспоненциальном распределении колебаний осевой нагрузки

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{03}'' &= A(e^{-\lambda g_{\min}} - e^{-\lambda g_{\max}}) + \\ &+ (B + Cv + Dv^2)\lambda \ln \frac{g_{\max}}{g_{\min}} + \\ &+ (B + Cv + Dv^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \lambda^{n+1}}{n!} \cdot \frac{g_{\max}^n - g_{\min}^n}{n}. \end{aligned} \quad (29)$$

Если колебания осевой нагрузки описываются нормальным законом, то

$$P(g_0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(g_0 - M[g_0])^2}{2\sigma^2}\right). \quad (30)$$

Для этого закона распределения колебаний g_0

$$M[g_0] = \bar{g}_0; \quad D[g_0] = \sigma^2; \quad A[g_0] = 0. \quad (31)$$

Действительное значение основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{0н}'' &= \int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \left(A + \frac{B + Cv + Dv^2}{g_0} \right) \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{(g_0 - \bar{g}_0)^2}{2\sigma^2}\right) dg_0. \end{aligned} \quad (32)$$

Получить решение приведенного интеграла достаточно сложно, поэтому предлагается упрощенный (с некоторой погрешностью) метод расчета основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов при нормальном законе распределения колебаний осевой нагрузки.

Учитывая свойство нормального закона распределения, установим математическое ожидание осевой нагрузки в зонах от g_{\min} до \bar{g}_0 и от \bar{g}_0 до g_{\max} (рисунок 5).

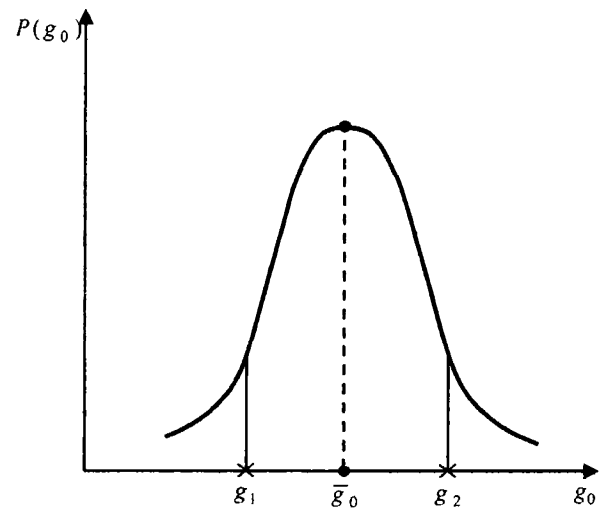


Рисунок 5 – Принципиальная схема для расчета величин g_1 и g_2

Очевидно, что

$$g_1 = \frac{\int_{g_{\min}}^{\bar{g}_0} g_0 P(g_0) dg_0}{\int_{g_{\min}}^{\bar{g}_0} P(g_0) dg_0}; \quad (33)$$

$$g_2 = \frac{\int_{\bar{g}_0}^{g_{\max}} g_0 P(g_0) dg_0}{\int_{\bar{g}_0}^{g_{\max}} P(g_0) dg_0}. \quad (34)$$

После подстановки в (33) значения $P(g_0)$ из (30) получим

$$g_1 = \frac{\int_{g_{\min}}^{\bar{g}_0} g_0 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(g_0 - \bar{g}_0)^2}{2\sigma^2}\right) dg_0}{\int_{g_{\min}}^{\bar{g}_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(g_0 - \bar{g}_0)^2}{2\sigma^2}\right) dg_0}. \quad (35)$$

Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательные выражения для расчета g_1 и g_2 :

$$g_1 = \bar{g}_0 - 0,798\sigma; \quad (36)$$

$$g_2 = \bar{g}_0 + 0,798\sigma. \quad (37)$$

Таким образом (с учетом некоторой погрешности), действительное значение основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов при нормальном законе распределения колебаний

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = 0,5 \left(A + \frac{B + Cv + Dv^2}{g_1} + A + \frac{B + Cv + Dv^2}{g_2} \right). \quad (38)$$

Преобразовав (38), получим

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = 0,5 \left[2A + (B + Cv + Dv^2) \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \right) \right]. \quad (39)$$

С учетом выражений (36) и (37)

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = 0,5 \left[2A + (B + Cv + Dv^2) \frac{2\bar{g}_0}{\bar{g}_0^2 - (0,798\sigma)^2} \right]; \quad (40)$$

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = A + \frac{(B + Cv + Dv^2)\bar{g}_0}{\bar{g}_0^2 - 0,637\sigma^2}. \quad (41)$$

Например, если $v = 90$ км/ч, путь звеньевой, $\bar{g}_0 = 13$ т, а $\sigma = 2,6$ т, то по формуле (41)

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = 0,7 + \frac{(3 + 0,1 \cdot 90 + 0,0025 \cdot 90^2) \cdot 13}{13^2 - 0,637 \cdot 2,6^2} = 3,25 \text{ Н/кН.}$$

Относительная ошибка в расчете основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов при распределении колебаний осевой нагрузки по нормальному закону

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{(3,25 - 3,18) \cdot 13}{3,18 \cdot 100} = 2,2 \%. \quad (42)$$

Известно, что

$$\sigma = \gamma \bar{g}_0, \quad (42)$$

где γ – коэффициент вариации колебаний осевой нагрузки.

Подставив (42) в (41), получим выражение

$$\tilde{\omega}_{\text{он}}'' = A + \frac{(B + Cv + Dv^2)}{\bar{g}_0(1 - 0,637\gamma^2)}. \quad (43)$$

Из сравнения (43) с (3) следует, что всегда $\tilde{\omega}_{\text{он}}'' > \tilde{\omega}_0''$ или другими словами, распределение колебаний осевой нагрузки по нормальному закону всегда приводит к росту основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов на участке железной дороги. Сравнительная оценка вероятностного подхода к расчету основного удельного сопротивления с детерминированным показана, в некоторой степени, на рисунках 6 и 7.

Анализ рисунков 6 и 7 позволяет отметить:

- участки с нормальным законом распределения колебаний осевой нагрузки всегда будут испытывать, по существующей системе расчетов, дефицит топливно-энергетических ресурсов;

- для нормального закона распределения колебаний осевой нагрузки ошибка расчета основного удельного сопротивления движению груженых вагонов значительно меньше, чем для равномер-

ного закона, который обладает более высокой степенью неопределенности;

- стабилизация структуры перевозимых грузов позволяет снизить отрицательное влияние колебаний осевой нагрузки на основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов;

- рост скорости движения грузовых поездов также приводит к увеличению ошибки расчета основного удельного сопротивления; скрытым резервом экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов является повышение средней осевой нагрузки.

Обобщение результатов, полученных при анализе влияния неопределенности осевой нагрузки вагона на основное удельное сопротивление движению, позволяет сделать несколько выводов:

- 1 Для симметричных законов распределения колебаний осевой нагрузки (равномерное распределение, нормальный закон распределения и др.) действующая система нормирования основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов дает заниженные результаты. Депо, обслуживающие участки с такими законами распределения колебаний осевой нагрузки, будут при действующей системе расчетов испытывать недостаток в топливно-энергетических ресурсах.

- 2 Для участков с асимметричными законами распределения колебаний осевой нагрузки, особенно если коэффициент асимметрии $A[g_0]$ больше нуля, условия работы участков будут еще более сложными:

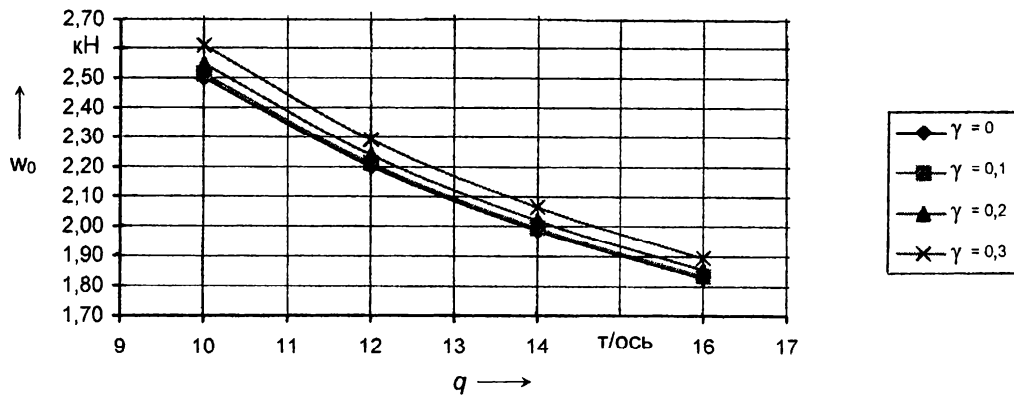
$$A[g_0] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\omega_0'' - \omega_0''[g_0])^3 P(g_0) dg_0}{(\sigma[g_0])^3} = 0, \quad (44)$$

где $\sigma[g_0]$ – среднее квадратическое отклонение осевой нагрузки.

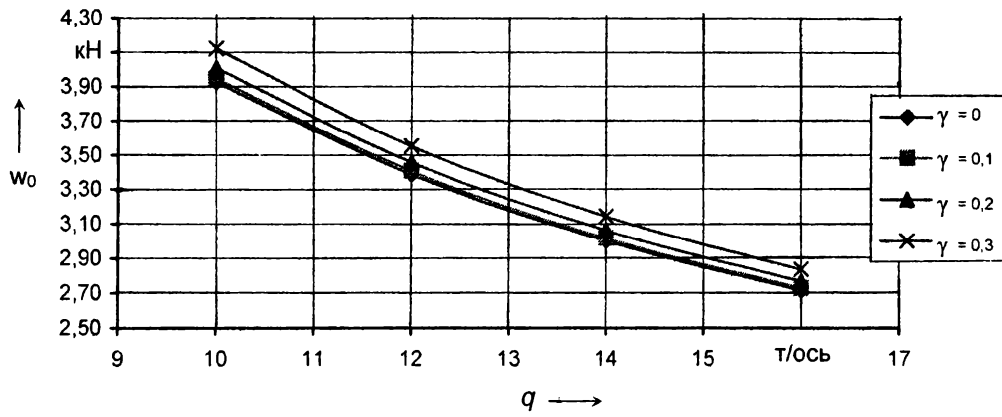
- 3 Если на участке коэффициент асимметрии закона распределения колебаний осевой нагрузки меньше нуля, то действительное значение основного удельного сопротивления будет меньше нормируемого. В практике эксплуатации железнодорожных линий это означает, что если в транспортном потоке преобладают тяжелые вагоны, то такие линии будут «экономить» энергетические ресурсы и, наоборот, если легкие, то будет ощущаться дефицит топливно-энергетических ресурсов.

- 4 Переход к вероятностной концепции расчета основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов позволяет повысить точность расчета массы состава и скорости движения поездов, снизить расход топливно-энергетических ресурсов на единицу перевозочной работы.

а)



б)



в)

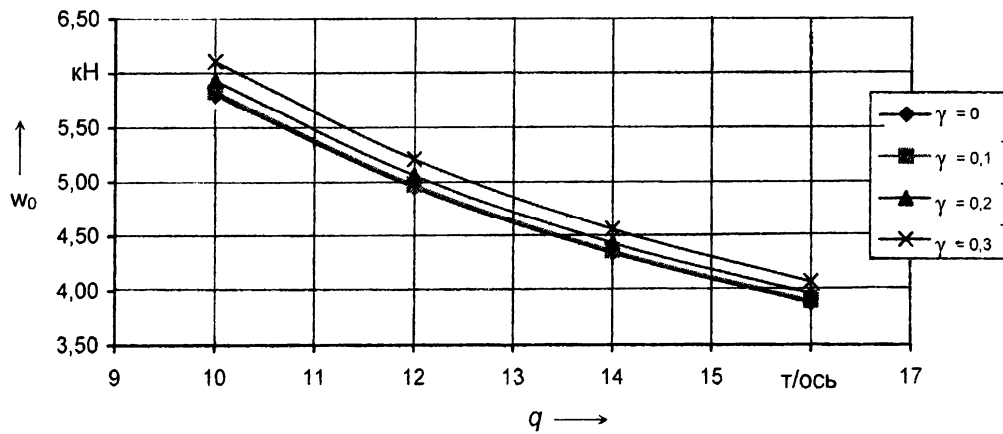


Рисунок 6 – Изменение основного удельного сопротивления движению вагонов при нормальном законе распределения колебаний осевой нагрузки:
а – при $v = 60$ км/ч; б – при $v = 90$ км/ч; в – при $v = 120$ км/ч

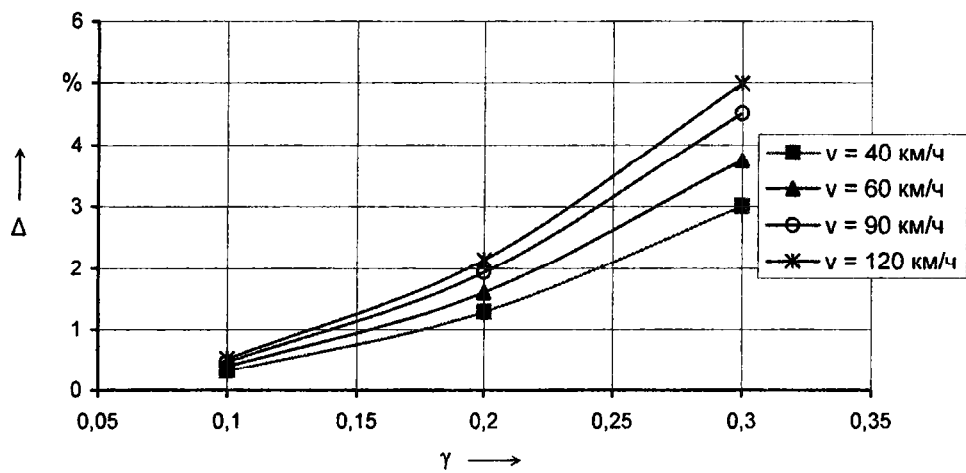
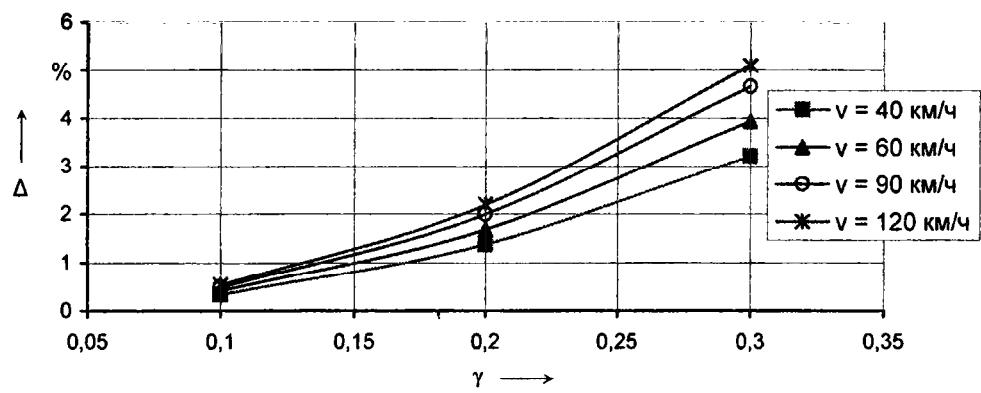
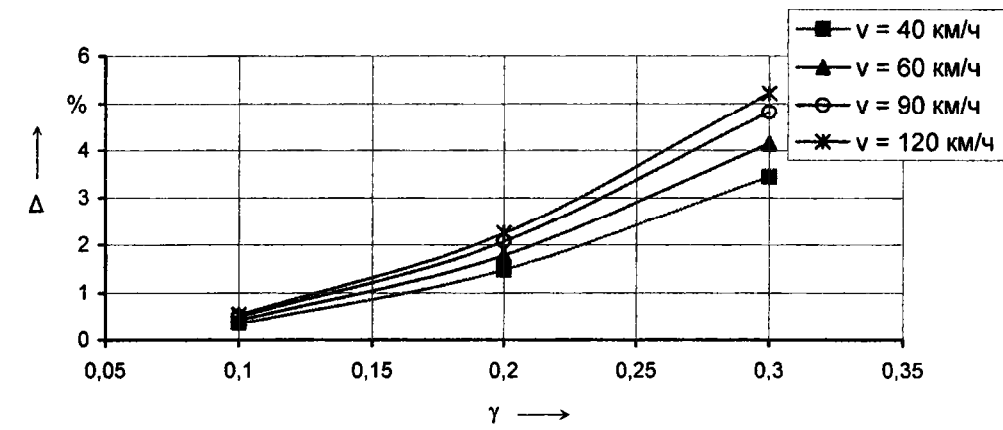


Рисунок 7 – Изменение относительной ошибки расчета основного удельного сопротивления движению вагонов при нормальном законе распределения колебаний осевой нагрузки:
 а – при $q = 12$ т/ось; б – при $q = 14$ т/ось; в – при $q = 16$ т/ось

Список литературы

- 1 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
- 2 **Бабичков, А. М.** Тяга поездов / А. М. Бабичков, В. Ф. Егорченко. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – 288 с.

Получено 04.10.2006

S. V. Negrey. Probabilistic models in the theory of traction calculations.

In the study the problems of the application of probabilistic models in the theory of transportation process are considered. It has been shown that numerous parameters that influence the basic specific resistance to traffic are of probabilistic nature. Some analytic relations that take into account the probabilistic nature of axial load are offered for the calculation of the basic specific resistance. The value of the relative error of the basic specific resistance calculation under different laws of axial load distribution has been studied.

3 **Молярчук, В. С.** Теоретические основы методики нормирования топлива и электроэнергии для тяговых средств транспорта / В. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1996. – 264 с.

4 **Правдин, Н. В.** Взаимодействие различных видов транспорта (примеры и расчеты) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев. – М. : Транспорт, 1989. – 208 с.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2007. № 1–2(14–15)

УДК 656.222

В. М. КРИВЦОВА, младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА НАПРАВЛЕНИЯХ

Рассматриваются вопросы определения оптимальной скорости движения поезда. Поставленная задача заключается в таком распределении скоростей движения грузовых и пассажирских поездов по участкам магистрали, при котором достигается минимум расходов. В рассматриваемой экономико-математической модели учитываются затраты времени на перемещение и энергетических ресурсов на преодоление основного удельного сопротивления, зависящих от скорости движения поезда. Предлагается для расчета оптимальной скорости учитывать колебание ряда параметров перевозочного процесса по направлениям, в частности, осевой нагрузки, величины состава, доли порожних вагонов в составе. Исследована величина относительной ошибки расчета оптимальной скорости движения с использованием установленной среднестроительной ставки поезда-часа. Приведена оценка экономической эффективности применения предлагаемой модели расчета для отдельных участков Брестского отделения Белорусской железной дороги.

В современных условиях одним из ключевых направлений совершенствования организации перевозочного процесса является оптимизация скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, которые в значительной мере определяют экономические показатели работы Белорусской железной дороги. В частности, увеличение скорости движения приводит к росту энергозатрат на тягу поезда, расходов на ремонт, однако сокращает расходы, связанные с содержанием подвижного состава, работой поездных бригад и других, а при дополнительных мерах позволяет сократить удельный расход топлива на тягу поездов и повысить в целом эффективность перевозочного процесса.

Исследование вопросов оптимизации скоростей движения поездов и поиск оптимальных решений проводилось в тесной взаимосвязи с существующими экономическими и техническими факторами. Так, расходы, связанные с тягой вагонов, следует рассчитывать не по усредненным ставкам удельного расхода топлива (электроэнергии) на 10000 т км брутто, а по индивидуальному расчету механической работы на тягу поезда. В общем ви-

де характер зависимости расходов от скорости движения поезда описывается уравнением

$$E = e_{п.ч} \frac{S}{v_{уч}} + e_3 A, \quad (1)$$

где $e_{п.ч}$ – стоимость поезда-часа, р.; S – длина участка, км; $v_{уч}$ – участковая скорость движения пассажирского поезда, км/ч; e_3 – стоимость 1 кВт·ч, р.; A – расход энергии на тягу поезда,

$$A = \frac{(P + Q)g}{3600\eta} (w_0 + i_3) S; \quad (2)$$

P – масса локомотива, т; Q – масса поезда, т; g – ускорение свободного падения, м/с²; 3600 – переводной коэффициент (Дж в кВт ч); η – коэффициент полезного действия локомотива; w_0 – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН; i_3 – эквивалентный уклон, ‰.

Основное удельное сопротивление движению вагонов на роликовых подшипниках ($q_0 > 6$ т) определяется по следующей принципиальной зависимости [1]: