

УДК 656.021.5

В. Я. НЕГРЕЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ «ЛЁГКИХ» И «ТЯЖЁЛЫХ» ПОЕЗДОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ

Сравнительными расчетами доказывается энергоэффективность технологии раздельного формирования «тяжёлых» и «лёгких» поездов, зависящей от степени заполнения пропускной способности участка и количества главных путей на перегоне, а также от размеров движения грузовых и пассажирских поездов, соотношения их скоростей движения, уровня технического оснащения сортировочной станции и количества раздельных пунктов на железнодорожном участке. Показано, что при увеличении уровня загрузки железнодорожного участка эффективность раздельного формирования «лёгких» и «тяжёлых» поездов повышается.

Повышение энергоэффективности перевозочного процесса, а также тенденция постоянного роста стоимости энергетических ресурсов, необходимость повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта существенно изменили отношение к задаче энергоэффективности перевозочного процесса. Одной из возможных технологий повышения энергоэффективности работы сортировочных станций является раздельное формирование тяжеловесных и длиннооставных поездов при ограниченной длине приемо-отправочных путей.

Для целого ряда назначений плана формирования поездов осевая нагрузка вагонов описывается нормальным законом распределения

$$P(q_0) = \frac{1}{\sigma_{q_0} \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{U^2}{2}, \quad (1)$$

где

$$U = \frac{q_0 - \bar{q}_0}{\sigma_{q_0}},$$

\bar{q}_0 – математическое ожидание случайной величины q_0 , т/ось; σ_{q_0} – среднее квадратическое отклонение осевой нагрузки, т.

С достаточной точностью

$$\sigma_{q_0} = \beta \sqrt{\bar{q}_0}, \quad (2)$$

где β – коэффициент, который изменяется в пределах от 0,5 до 0,8.

Границы для отнесения вагона к категории «лёгкий» или «тяжёлый» выбираются на основе анализа структуры погонопотоков отдельных назначений их мощностей и дальности следования. Наиболее часто принимается что вагон «лёгкий», если

$$q_{0л} \leq \bar{q}_0,$$

«тяжёлый», если

$$q_{0т} \geq \bar{q}_0.$$

При такой частой процедуре выбора категории вагона и нормальном законе распределения среднее значение осевой нагрузки «лёгких» вагонов

$$\bar{q}_{0л} = \bar{q}_0 - \frac{\int_0^0 q_0 P(q_0) dq_0}{\int_{-\infty}^0 P(q_0) dq_0}. \quad (3)$$

Для «тяжёлых» вагонов

$$\bar{q}_{0т} = \bar{q}_0 + \frac{\int_0^{\infty} q_0 P(q_0) dq_0}{\int_0^{\infty} P(q_0) dq_0}. \quad (4)$$

После подстановки (1) в (3) получается

$$\bar{q}_{0л} = \bar{q}_0 - \frac{\int_{-\infty}^0 q_0 \frac{1}{\sigma_{q_0} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{q_0^2}{2\sigma_{q_0}^2}} dq_0}{\int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_{q_0} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{q_0^2}{2\sigma_{q_0}^2}} dq_0}. \quad (5)$$

Опуская промежуточные выкладки, получим окончательное выражение для расчета $\bar{q}_{0л}, \bar{q}_{0т}$, т/ось, в этом частном случае деления вагонов на «лёгкие» и «тяжёлые»:

$$\bar{q}_{0л} = \bar{q}_0 - 0,798\sqrt{\sigma_{q_0}}, \quad \bar{q}_{0т} = \bar{q}_0 + 0,798\sqrt{\sigma_{q_0}}. \quad (6)$$

Например, если $\bar{q}_0 = 15$, $\sigma_{q_0} = 3$, то

$$\bar{q}_{0л} = 15 - 0,798\sqrt{3} = 13,6; \quad \bar{q}_{0т} = 16,4.$$

Удельное сопротивление движению локомотива в режиме тяги на бесстыковом пути определяется по формуле

$$w'_{0т} = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2. \quad (7)$$

В режиме холостого хода

$$w'_{0х} = 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2. \quad (8)$$

Средневзвешенное основное удельное сопротивление движению локомотива

$$w'_0 = \beta w'_{0т} + (1 - \beta) w'_{0х}, \quad (9)$$

где β – доля режима тяги при движении поезда.

Работа по определению сил сопротивления при движении поезда, т·км,

$$R = L(m_л w'_0 + m_с w''_0 + (m_л + m_с) i_3) N_с \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

где L – длина участка, км; $m_л, m_с$ – масса брутто соответственно локомотива и состава, т; $N_с$ – среднесуточное количество поездов данного назначения.

При раздельном формировании «лёгких» и «тяжёлых» поездов

$$N_{сл} = \frac{m_{сут,л}}{n_с}, \quad (11)$$

где $m_{сут,л}$ – суточное количество «лёгких» вагонов; $n_с$ – количество вагонов в составе «лёгкого» поезда.

Аналогичным образом рассчитывается $N_{ст}$.

Годовая экономия дизельного топлива при раздельном формировании поездов

$$\Delta B = 365 \cdot 0,85R. \quad (12)$$

Для иллюстрации энергоэффективности рассмотрим пример для участка длиной 320 км, обслуживаемого локомотивом массой 276 т и технической скоростью движения 70 км/ч. В режиме тяги $\beta = 0,65$. Среднесуточное количество вагонов данного назначения 240, математическое ожидание осевой нагрузки 15 т/ось, а её среднее квадратическое отклонение 3 т. Эквивалентный уклон $i_3 = 0,3$ ‰.

Для исходного варианта формирования поездов основное удельное сопротивление движению грузовых поездов составляет

$$w''_0 = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 70 + 0,002 \cdot 70^2}{15} = 1,97 \text{ кг/т.}$$

При раздельном формировании поездов осевая нагрузка для «тяжёлых» вагонов

$$\bar{q}_{0т} = 15 + 0,798\sqrt{3} = 16,38 \text{ т/ось.}$$

Для «лёгких»

$$\bar{q}_{0л} = 15 - 0,798\sqrt{3} = 13,62 \text{ т/ось.}$$

Удельное сопротивление движению «тяжёлых» вагонов

$$w''_{0т} = 0,7 + \frac{3,0 + 0,09 \cdot 70 + 0,002 \cdot 70^2}{16,38} = 1,87 \text{ кг/т.}$$

Для «лёгких» вагонов $w''_{0л} = 2,10$ кг/т.

Удельное сопротивление движению локомотива в режиме тяги $w'_{0т} = 3,69$ кг/т, а в режиме холостого хода – 4,75 кг/т. Средневзвешенное удельное сопротивление движению локомотива, если доля режима тяги $\beta = 0,65$ составит 4,06 кг/т.

Работа по преодолению сил сопротивления при исходном варианте формирования составов

$$R = 320(276 \cdot 4,06 + 1,97 \cdot 3600 + (276 + 3600) \cdot 0,3) \cdot \frac{240}{60} \cdot 10^{-3} = 12000,5 \text{ т} \cdot \text{км.}$$

Работа по преодолению сил сопротивления «легких» поездов, включающих 80 вагонов,

$$R_{л} = 320(276 \cdot 4,06 + 13,6 \cdot 4 \cdot 80 \cdot 2,10 + (276 + 13,6 \cdot 4 \cdot 80) \cdot 0,3) \cdot \frac{120}{80} \cdot 10^{-3} = 5591,1 \text{ т} \cdot \text{км.}$$

Для «тяжёлых» поездов

$$R_{т} = 320(276 \cdot 4,06 + 16,4 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 1,87 + (276 + 16,4 \cdot 4 \cdot 60) \cdot 0,3) \cdot \frac{120}{60} \cdot \frac{15,0}{16,4} \cdot 10^{-3} = 5704,1 \text{ т} \cdot \text{км.}$$

Суммарная работа по преодолению сил сопротивления при раздельном формировании поездов $R_c = 11295,2$ т·км.

Раздельное формирование поездов данного назначения обеспечивает экономию механической работы локомотивов

$$\Delta R = 12000,5 - 11295,2 = 705,3 \text{ т} \cdot \text{км.}$$

Годовая экономия дизельного топлива

$$\Delta B = 365 \cdot 0,85 \cdot 705,3 = 218819 \text{ кг} = 218,8 \text{ т.}$$

Экономия ТЭР существенно зависит от продольного профиля железнодорожной линии. Исследования показали, что при уменьшении эквивалентного уклона величина экономии ТЭР также сокращается. Раздельное формирование «тяжёлых» и «лёгких» поездов позволяет получить существенный эффект, который возникает в связи с сокращением размеров движения на железнодорожной линии и ростом участковой скорости.

При традиционной технологии работы сортировочной станции коэффициент участковой скорости на однопутных линиях

$$\beta = \frac{(24 - t_{ст}(n_{гр} + 2n_{пас}))L}{24L - 12v_x t_{ст}}, \quad (13)$$

где L – длина однопутного участка; $n_{гр}$, $n_{пас}$ – среднесуточное количество соответственно грузовых и пассажирских поездов на участке; $t_{ст}$ – продолжительность нахождения вагонов на станции.

Величина $t_{ст}$ определяется по формуле

$$t_{\text{ст}} = (0,12 + 0,01n_p) \frac{2L}{z_{\text{пер}} v_x} + \sum \tau_{\text{рз}}, \quad (14)$$

где n_p – расчётное количество поездов на участке; $z_{\text{пер}}$ – количество перегонов на участке; v_x – ходовая скорость; $\sum \tau_{\text{рз}}$ – продолжительность разгона и замедления поезда.

При раздельном формировании поездов

$$\beta_{\text{рф}} = \frac{(24 - t_{\text{ст}}(n_{\text{гр}} - \Delta n_{\text{гр}} - 2n_{\text{пас}}))L}{24L - 12v_x t_{\text{ст}}}, \quad (15)$$

$$t_{\text{ст}} = (0,12 + 0,01(n_p - \Delta n)) \frac{2L}{z_{\text{пер}} v_x} + \sum \tau_{\text{рз}}. \quad (16)$$

При сравнении выражений (15) и (13) очевидно, что $\beta_{\text{рф}} > \beta$, что свидетельствует о повышении участковой скорости на величину

$$\Delta v_{\text{уч}} = v_x (\beta_{\text{рф}} - \beta). \quad (17)$$

Кроме повышения участковой скорости раздельное формирование «лёгких» и «тяжёлых» поездов сокращает количество остановок грузовых поездов на раздельных пунктах для скрещения и обгонов, приходящийся на пару поездов.

Для исходного варианта

$$k_{\text{ост}} = \frac{(n_{\text{гр}} + 2n_{\text{пас}})L}{12v_x \beta} - 1. \quad (18)$$

Для предлагаемой технологии

$$k_{\text{ост}}^{\text{р}} = \frac{(n_{\text{гр}} - \Delta n_{\text{гр}} - 2n_{\text{пас}})L}{12v_x \beta_{\text{рф}}} - 1. \quad (19)$$

Общее количество остановок поездов на участке за сутки

$$\bar{k}_{\text{ост}} = \left(\frac{k_{\text{ост}}}{2} + 1 \right) \cdot 2n_{\text{гр}}. \quad (20)$$

Среднесуточная экономия ТЭР из-за сокращения количества остановок на участке

$$\Delta B = 0,85 \left[\left(\frac{k_{\text{ост}}}{2} + 1 \right) \cdot 2n_{\text{гр}} b_{\text{ост}} - \left(\frac{k_{\text{ост}}^{\text{р}}}{2} + 1 \right) (2n_{\text{гр}} - \Delta n_{\text{гр}}) b_{\text{ост}}^{\text{р}} \right], \quad (21)$$

где $b_{\text{ост}}$, $b_{\text{ост}}^{\text{р}}$ – механическая работа локомотива, связанная с остановкой поезда на раздельном пункте для скрещения или обгона.

Анализ энергетической эффективности раздельного формирования поездов показывает, что она зависит от степени заполнения пропускной способ-

ности участка и количества главных путей на перегоне. С ростом уровня загрузки участка раздельное формирование «лёгких» и «тяжёлых» поездов энергетическая эффективность повышается. Энергоэффективность существенно зависит от размеров движения грузовых и пассажирских поездов и соотношения их скоростей движения. Значительное влияние на эффективность раздельного формирования оказывает уровень технического оснащения сортировочной станции и количество раздельных пунктов на железнодорожном участке.

Таким образом, использование технологии раздельного формирования «тяжёлых» и «лёгких» поездов позволяет повысить энергоэффективность перевозочного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Негрей, В. Я. Энергоэффективность перевозочного процесса / В. Я. Негрей // Тихомировские чтения: Инновационные технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 29–32.

2 Негрей, В. Я. Развитие теории расчета плана формирования однопутных поездов / В. Я. Негрей, К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 2. – С. 123–126.

3 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов / П. С. Грунтов [и др.]; под общ. ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.

4 Сортировочные станции : учеб. пособие / М. Н. Луговцов [и др.] – Гомель : БелГУТ, 2009. – 248 с.

5 Негрей, В. Я. Повышение безопасности и энергоэффективности перевозочного процесса / В. Я. Негрей, Д. В. Козлович // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 51–52.

V. Ja. NEGREY

ENERGY EFFICIENCY OF SEPARATE FORMATION «EASY» AND «HEAVY» TRAINS AT SORTING STATIONS

By comparative accounts is proved energy efficiency of technology separate formation «heavy» and «easy» trains dependent from a degree of filling throughput a site and quantity the main ways on railway line, and also from the sizes of movement cargo and passenger trains, parity of their speeds movement, level a hardware of sorting station and quantity of separate items on a railway site. Is shown, that at increase a level of loading a railway line the efficiency separate formation of «easy» and «heavy» trains raises.

Получено 02.12.2022