

УДК 656.222.3:656.2.07

В. Я. НЕГРЕЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель,  
К. М. ШКУРИН, Белорусская железная дорога, г. Минск

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Проанализирована методика оценки колебаний параметров, характеризующих эффективность системы организации вагонопотоков, в условиях неопределенности продолжительности выполнения технологических операций. Показано, что с учетом того, что неопределенность транзитного вагонопотока без переработки существенно ниже, чем у транзитного вагонопотока с переработкой, целесообразно повышать на направлении долю поездов, которые проследуют технические станции без переработки.

**О**птимизация системы организации вагонопотоков в случаях, когда известны все условия  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$  и любой набор управленческих действий  $(x_1, x_2, \dots)$  позволяет однозначно определить критерий оптимальности, является наиболее простой и не часто встречается в практике. Более типичной является ситуация, когда не все условия однозначно известны, а содержат элемент неопределенности. Например, простой конкретного вагона состава поезда под накоплением колеблется от нескольких минут до 12 и более часов. Возникают случаи продолжительного простоя сформированного состава в ожидании подачи поезда локомотива или нитки графика. Процесс проследования вагонопотока по железнодорожному участку также подвержен колебаниям, хотя и в несколько меньшей степени. Высокий уровень неопределенности системы организации вагонопотоков связан с колебаниями транспортных потоков.

Многочисленные исследования, выполненные в университетах и научно-исследовательских организациях [4], позволили установить законы распределения суточных колебаний вагонопотоков. Наибольшее распространение получил нормальный закон:

$$P(n) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right), \quad (1)$$

при значении  $\mu$ , определяемом по формуле

$$\mu = \frac{n - \bar{n}}{\sigma_n}, \quad (2)$$

где  $\sigma_n$  – среднее квадратическое отклонение размера вагонопотока (поездопотока);  $\bar{n}$  – среднее значение размера вагонопотока (поездопотока).

Рекомендуемые зоны действия нормального и других законов распределения суточных колебаний транспортных потоков приведены в [4].

Аналогичные исследования выполнены для описания колебаний продолжительности нахождения вагонов на станциях и участках. В частности, колебания продолжительности нахождения на станции транзитного вагона описываются нормальным (реже логнормальным) законом распределения, т. е.

$$P(t_{cn}) = \frac{1}{\sigma_{cn} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t_{cn} - \bar{t}_{cn})^2}{2\sigma_{cn}^2}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{cn}$  – среднее квадратическое отклонение продолжительности нахождения транзитного вагона с пере-

работкой на технической станции;  $t_{cn}$  – продолжительность нахождения отдельного транзитного вагона с переработкой на технической станции;  $\bar{t}_{cn}$  – средняя продолжительность нахождения транзитного вагона с переработкой на технической станции.

Используя свертку распределений, колебания суммарной продолжительности нахождения вагона после прохода  $q$  станций можно также описать нормальным законом распределения с параметрами:

– математическое ожидание:

$$\bar{t}_{cn} = \bar{t}_{cn1} + \bar{t}_{cn2} + \dots + \bar{t}_{cnq}, \quad (4)$$

– среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_{cn} = \sqrt{\sigma_{cn1}^2 + \sigma_{cn2}^2 + \dots + \sigma_{cnq}^2}. \quad (5)$$

Продолжительность нахождения на станции транзитного вагона без переработки определяется аналогичным образом. В частности, при нормальном законе распределения

$$P(t_{6n}) = \frac{1}{\sigma_{6n} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t_{6n} - \bar{t}_{6n})^2}{2\sigma_{6n}^2}\right). \quad (6)$$

После прохождения  $q$  станций участка математическое ожидание продолжительности нахождения на участке транзитного вагона без переработки

$$\bar{t}_{6n} = \bar{t}_{6n1} + \bar{t}_{6n2} + \dots + \bar{t}_{6nq}. \quad (7)$$

Среднее квадратическое отклонение продолжительности нахождения на участке транзитного вагона без переработки

$$\sigma_{6n} = \sigma_{6n1} + \sigma_{6n2} + \dots + \sigma_{6nq}. \quad (8)$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{6n}$  и  $\sigma_{cn}$  определяется по формуле

$$\sigma_{np} = a \bar{t}_{np}^b, \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, которые зависят от категории поезда;  $\bar{t}_{np}$  – средняя продолжительность нахождения транзитного вагона без переработки на технической станции.

Существенное влияние на синергетический критерий оказывает неопределенность продолжительности нахождения поездов на направлении. Для нормального закона распределения колебаний продолжительности нахождения поезда на направлении

$$H(\bar{t}) = \log(\sigma_i \sqrt{2\pi e}), \quad (10)$$

где  $H(\bar{t})$  – неопределенность суммарной продолжительности нахождения поезда на направлении;  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение продолжительности нахождения поезда на технических станциях направления,

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{i,2}^2 + \dots + \sigma_{i,q-1}^2}, \quad (11)$$

$q$  – количество технических станций на направлении.

Рассмотрим условное железнодорожное направление А–D (рисунок 1), на котором для транзитных поездов, поступающих в переработку,  $a = 0,6$ ,  $b = 0,5$ . Для транзитных поездов без переработки  $a = 0,3$ ,  $b = 0,5$ .

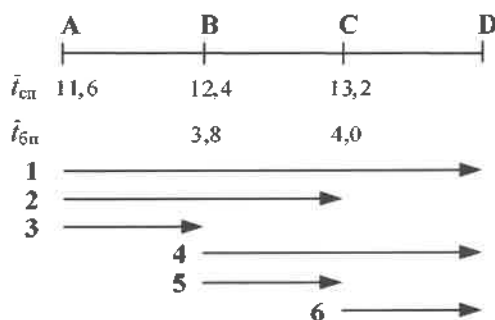


Рисунок 1 – Характеристика направления А–D

Учитывая, что  $\bar{t}_{сн} = 12,4$  ч, а  $\bar{t}_{бп} = 4,0$  ч,

$$\sigma_{сн} = 0,6 \cdot 12,4^{0,5} = 2,1 \text{ ч},$$

$$\sigma_{бп} = 0,3 \cdot 4,0^{0,5} = 0,6 \text{ ч}.$$

Если струя № 1 продвигается по участковой схеме (перерабатывается на станциях В и С), то средняя продолжительность простоя на станциях

$$\bar{t}_{сн,1} = 11,6 + 12,4 + 13,2 = 37,2 \text{ ч}.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{сн,1} = \sqrt{(0,6 \cdot 11,6^{0,5})^2 + (0,6 \cdot 12,4^{0,5})^2 + (0,6 \cdot 13,2^{0,5})^2} =$$

$$= \sqrt{4,18 + 4,46 + 4,75} = 3,66 \text{ ч}.$$

Когда струя № 1 выделяется в самостоятельное назначение, то

$$\bar{t}_{тр,1} = 11,6 + 3,8 + 4,0 = 19,4 \text{ ч}.$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{тр,1} = \sqrt{(0,6 \cdot 11,6^{0,5})^2 + (0,3 \cdot 3,8^{0,5})^2 + (0,3 \cdot 4,0^{0,5})^2} =$$

$$= \sqrt{4,18 + 0,34 + 0,36} = 2,21 \text{ ч}.$$

Используя схему, приведенную на рисунке 2, для оценки экономии от проследования струй транзитом найдем разность двух случайных величин  $t_{сн}^*$  и  $t_{тр}^*$ :

$$\Delta t^* = t_{сн}^* - t_{тр}^*. \quad (12)$$

Подставляя в формулу (12) значения случайных величин, получим:

$$P(\Delta t^*) = P(t_{сн}^*) - P(t_{тр}^*). \quad (13)$$

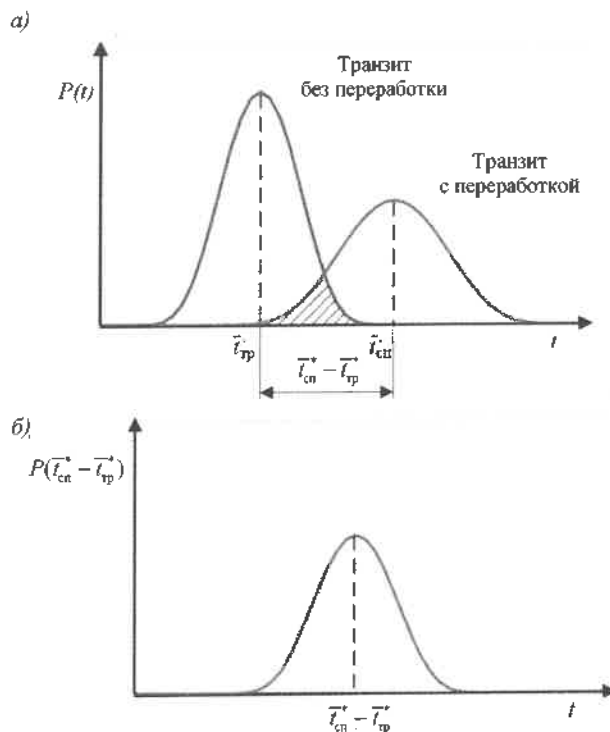


Рисунок 2 – Определение экономии продолжительности нахождения вагона на технических станциях

Разность двух случайных величин, описываемых нормальным законом распределения, также описывается нормальным законом [4] с параметрами:

– математическое ожидание:

$$\Delta \bar{t}^* = \bar{t}_{сн}^* - \bar{t}_{тр}^*. \quad (14)$$

– среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{сн}^2 + \sigma_{тр}^2}. \quad (15)$$

Для рассмотренного выше примера

$$\Delta \bar{t}^* = 37,2 - 19,4 = 17,8 \text{ ч};$$

$$\sigma_i = \sqrt{3,66^2 + 2,21^2} = 4,27 \text{ ч}.$$

Таким образом, неопределенность синергетического эффекта от проследования технических станций без переработки значительно ниже неопределенности потока, следующего в участковых поездах на направлении. Поэтому с целью повышения эффективности системы организации вагонопотоков, снижения вероятности возникновения сбоев в транспортной работе целесообразно повышать транзитность вагонопотоков.

На примере направления А–D, на котором показана мощность вагонопотоков (рисунок 3), рассмотрим влияние повышения транзитности вагонопотоков на стабилизацию перевозочного процесса с учетом колебаний как продолжительности времени нахождения вагонов на технических станциях, так и продолжительности их следования по железнодорожным участкам.

В рассматриваемом примере расстояния между станциями равны и составляют 150 км; связанные с накоплением состава поезда затраты  $ст$  на всех технических станциях составляют 600 ваг·ч. Средний состав поезда, следующего по направлению А–D, равен 60 вагонам.

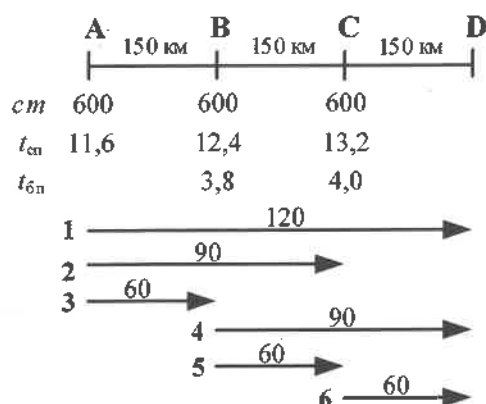


Рисунок 3 – Характеристика направления А–D

Для расчетов принимаем, что средняя скорость участковых поездов на направлении А–D  $v_{уч}$  составляет 50,0 км/ч, а скорость сквозных поездов  $v_{скв}$  превышает её на 10,0 % и составляет 55,0 км/ч.

Для упрощения расчетов рассмотрим исключительно затраты вагоно-часов, связанные с пропуском вагонопотока по направлению А–D, не учитывая соответствующие затраты локомотиво- и бригадо-часов. Выполним оценку затрат вагоно-часов для двух случаев – при пропуске всего вагонопотока по направлению в участковых поездах (вариант 1) и при выделении в самостоятельные назначения струй вагонопотока А–D, А–С, В–D (вариант 2). Графическая интерпретация вариантов пропуска вагонопотоков 1 и 2 представлена на рисунке 4.

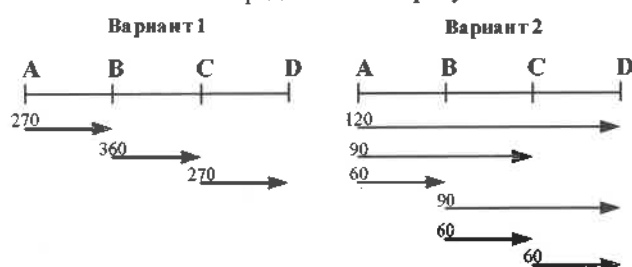


Рисунок 4 – Графическая интерпретация вариантов пропуска вагонопотоков

В таблице 1 приведена оценка затрат вагоно-часов, связанных с выбранной системой пропуска вагонопотоков (варианты пропуска вагонопотока 1 и 2), с учетом: затрат на накопление составов поездов на станциях А, В и С ( $B_{нак}^A$ ,  $B_{нак}^B$  и  $B_{нак}^C$  соответственно); затрат, связанных с простоем на станциях В и С транзитных вагонов с переработкой ( $B_{сп}^B$  и  $B_{сп}^C$ ) и без переработки ( $B_{бп}^B$  и  $B_{бп}^C$ ); затрат, связанных с проследованием вагонов по участкам А–В, В–С и С–D в участковых поездах ( $B_{уч}^{AB}$ ,  $B_{уч}^{BC}$  и  $B_{уч}^{CD}$ ) и в сквозных поездах ( $B_{скв}^{AB}$ ,  $B_{скв}^{BC}$  и  $B_{скв}^{CD}$ ).

Из таблицы 1 видно, что использование варианта 2 в сравнении с вариантом 1, предусматривающим пропуск всего вагонопотока в участковых поездах, обеспечивает ежесуточную экономию в размере 2134 ваг·ч.

Рассмотрим влияние на стабилизацию параметров перевозочного процесса варианта 2, который в сравнении с вариантом 1 обеспечивает большую транзитность вагонопотоков.

Таблица 1 – Сравнение вариантов пропуска вагонопотоков по направлению А–D

| Элемент перевозочного процесса | Затраты вагоно-часов |               |
|--------------------------------|----------------------|---------------|
|                                | по варианту 1        | по варианту 2 |
| $B_{нак}^A$                    | 600                  | 1 800         |
| $B_{уч}^{AB}$                  | 810                  | 180           |
| $B_{скв}^{AB}$                 | 0                    | 573           |
| $B_{нак}^B$                    | 600                  | 1 200         |
| $B_{сп}^B$                     | 2 604                | 0             |
| $B_{бп}^B$                     | 0                    | 798           |
| $B_{уч}^{BC}$                  | 1 080                | 180           |
| $B_{скв}^{BC}$                 | 0                    | 818           |
| $B_{нак}^C$                    | 600                  | 600           |
| $B_{сп}^C$                     | 2 772                | 0             |
| $B_{бп}^C$                     | 0                    | 840           |
| $B_{уч}^{CD}$                  | 810                  | 180           |
| $B_{скв}^{CD}$                 | 0                    | 573           |
| <b>Всего</b>                   | <b>9 876</b>         | <b>7 742</b>  |

Для расчетов принимаем, что для элементов перевозочного процесса, связанных с работой технических станций (накопление составов, переработка транзитных вагонов), среднееквадратическое отклонение  $\sigma$  составляет 50 % от математического ожидания времени выполнения соответствующих операций  $M$ . Поскольку в большинстве случаев процесс проследования вагонопотоков по железнодорожному участку характеризуется меньшей амплитудой колебаний параметров, для продолжительности следования вагонов по участку величину  $\sigma$  принимаем на уровне 30 % от  $M$ .

Оценка затрат вагоно-часов при выборе различных вариантов пропуска вагонопотоков с учетом величины среднееквадратического отклонения значений параметров перевозочного процесса  $\sigma$  приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение вариантов пропуска вагонопотоков по направлению А–D с учетом среднееквадратического отклонения значений параметров

| Элемент перевозочного процесса | Варианты пропуска вагонопотока |                  |              |                  |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------|------------------|
|                                | вариант 1                      |                  | вариант 2    |                  |
|                                | $M$ , ваг·ч                    | $\sigma$ , ваг·ч | $M$ , ваг·ч  | $\sigma$ , ваг·ч |
| $B_{нак}^A$                    | 600                            | 300              | 1 800        | 900              |
| $B_{уч}^{AB}$                  | 810                            | 243              | 180          | 54               |
| $B_{скв}^{AB}$                 | 0                              | 0                | 573          | 172              |
| $B_{нак}^B$                    | 600                            | 300              | 1 200        | 600              |
| $B_{сп}^B$                     | 2 604                          | 1 302            | 0            | 0                |
| $B_{бп}^B$                     | 0                              | 0                | 798          | 399              |
| $B_{уч}^{BC}$                  | 1 080                          | 324              | 180          | 54               |
| $B_{скв}^{BC}$                 | 0                              | 0                | 818          | 245              |
| $B_{нак}^C$                    | 600                            | 300              | 600          | 300              |
| $B_{сп}^C$                     | 2 772                          | 1 386            | 0            | 0                |
| $B_{бп}^C$                     | 0                              | 0                | 840          | 420              |
| $B_{уч}^{CD}$                  | 810                            | 243              | 180          | 54               |
| $B_{скв}^{CD}$                 | 0                              | 0                | 573          | 172              |
| <b>Всего</b>                   | <b>9 876</b>                   | <b>2 027</b>     | <b>7 742</b> | <b>1 313</b>     |

Общее среднеквадратическое отклонение при выборе вариантов 1 и 2 рассчитано путем вычисления квадратного корня из суммы дисперсий отдельных элементов:

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2}. \quad (16)$$

В рассмотренном случае среднеквадратическое отклонение затрат вагоно-часов при выборе варианта организации пропуска вагонопотоков, обеспечивающего наибольшую транзитность вагонопотоков, составило 1 313 ваг·ч, или 17,0 % от математического ожидания затрат вагоно-часов. При этом в случае пропуска всего вагонопотока по направлению А–D в участковых поездах среднеквадратическое отклонение затрат вагоно-часов составляет 2 027 ваг·ч, или 20,5 % от математического ожидания затрат вагоно-часов.

Таким образом, в рассмотренном варианте повышение транзитности вагонопотоков обеспечило некоторую стабилизацию перевозочного процесса, что положительно сказывается на эффективности принятия управленческих решений.

Расчеты, проведенные для других направлений, показывают, что повышение достоверности расчетов при выборе оптимального варианта плана формирования поездов, достигаемое за счет учета неопределенности

параметров перевозочного процесса, приводит к увеличению транзитности вагонопотоков.

Следует отметить, что величина достигнутого эффекта стабилизации перевозочного процесса в значительной степени зависит от характеристик рассматриваемого железнодорожного направления, и на более протяженных железнодорожных направлениях с большим количеством технических станций достигаемый эффект возрастает.

#### Список литературы

- 1 Акулиничев, В. М. Математические методы в эксплуатации железных дорог / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. Н. Корешков. – М. : Транспорт, 1981. – 223 с.
- 2 Негрей, В. Я. Развитие методов анализа перевозочного процесса / В. Я. Негрей, К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 23–25.
- 3 Негрей, В. Я. Эффективность внедрения адаптивно-регулярной системы организации вагонопотоков / В. Я. Негрей, К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2014. – № 1 (28). – С. 52–54.
- 4 Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.
- 5 Шапкин, И. Н. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах: методы, алгоритмы, технологии, расчеты / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов; под ред. И. Н. Шапкина. – М. : ИСПИ РАН, 2007. – 255 с.

Получено 04.04.2025

**V. J. Negrey, K. M. Shkurin.** The study of car flow organisation system in conditions of uncertainty of transportation process parameters.

The methodology for assessing fluctuations of parameters characterizing car flow organisation system efficiency is analyzed in conditions under which the duration of technological operations is uncertain. It is shown that given that the uncertainty of transit car flow without processing is significantly lower than that of transit car flow with processing, it is advisable to increase the share of through-trains, which pass technical stations without processing.