

УДК 656. 222. 3

В. Я. НЕГРЕЙ, доктор технических наук, К. М. ШКУРИН, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ

Рассмотрены важнейшие принципы традиционных методов расчета плана формирования поездов. Обосновывается целесообразность использования при разработке оптимального плана формирования поездов дополнительного параметра – «критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах». Проанализировано влияние различных факторов на экономию затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах.

Сложные процессы, происходящие в государственной экономике, требуют разработки новых подходов к управлению работой железнодорожного транспорта. Одной из важнейших задач, решение которой во многом определяет эффективность перевозочного процесса, является разработка плана формирования поездов (далее – ПФП). Именно ПФП определяет эффективность использования транспортной инфраструктуры, подвижного состава, трудовых и финансовых ресурсов.

В 1940-е годы проф. А. П. Петровым было предложено применение при разработке ПФП *метода абсолютно-го расчета*. Использование данного метода предусматривает выполнение расчетов для всех потенциально реализуемых вариантов плана формирования и оценку затрат вагоно-часов на накопление и переработку вагонов для каждого из них. В то же время недостатком метода абсолютно-го расчета является необходимость выполнения большого объема вычислений при разработке плана формирования для направлений, на которых расположено более чем 5-6 сортировочных станций.

Альтернативный подход к разработке ПФП применяется в аналитических методах, предусматривающих постепенное нахождение плана формирования, близкого к оптимальному, путем выполнения расчетов в несколько итераций. Наибольшее распространение среди таких методов получил *метод совмещенных аналитических сопоставлений*, автором которого является проф. К. А. Бернгард, усовершенствовавший разработанный ранее метод аналитических сопоставлений проф. И. И. Васильева. Метод совмещенных аналитических сопоставлений основывается на построении графика назначений струй вагонопотока и его последующей поэтапной корректировке путем выделения в оптимальный план формирования назначений, обеспечивающих максимальную экономию вагоно-часов, затрачиваемых на накопление и переработку вагонов.

Разработанный канд. техн. наук А. И. Поповым *метод направленного перебора вариантов* позволяет сократить объем вычислений при выборе оптимального варианта ПФП. При использовании данного метода множество вариантов плана формирования представляется в виде графа, на осях которого помещают вершины, номера которых соответствуют номерам сквозных струй. Вершины на соседних осях графа соединяются дугами, указывающими на их принадлежность к одному варианту ПФП. Расчет производят последовательно, начиная с верхней ветви графа и слева направо; при этом затраты вагоно-часов при переходе от вершины к вершине по дуге графа увеличиваются с учетом затрат на накопление и уменьшаются с учетом экономии от проследования без переработки попутных

станций. Если при переходе от одной вершины к другой происходит рост затрат приведенных вагоно-часов, дальнейшие расчеты по данной ветви прекращаются, что позволяет исключить заведомо неконкурентные варианты ПФП.

Расчет сетевого плана формирования производится на ЭВМ по алгоритму *метода улучшения плана*, разработанного проф. С. В. Дуваляном. Суть этого метода заключается в постепенном улучшении ПФП путем перехода от одного множества назначений к другому за счет дополнения его другими назначениями. Этот процесс начинается с множества обязательных назначений и заканчивается тогда, когда в ПФП оказываются включенными все назначения, которые уменьшают суммарные приведенные затраты на накопление и переработку транзитных вагонов.

Таким образом, в традиционных методах разработки оптимального ПФП в качестве критерия оценки целесообразности установления назначений грузовых поездов используется критерий минимизации вагоно-часов, затрачиваемых на накопление и переработку вагонов.

В то же время при использовании исключительно вышеуказанного критерия не учитываются эксплуатационные расходы, связанные с нахождением вагонов и локомотивов в движении, которые могут значительно превышать затраты на накопление вагонов.

Для оценки эксплуатационных расходов, связанных с выбором того или иного варианта ПФП, в связи с большим числом факторов, оказывающих на них влияние, целесообразным является использование в расчетах расходных ставок, характеризующих приходную единицу измерителя величину «переменных» расходов (расходов, изменяющихся при одинаковых условиях перевозок пропорционально этому измерителю).

В соответствии с Методическими рекомендациями по расчету экономических параметров, позволяющих оценить эксплуатационные расходы по технологическим операциям услуг железнодорожного транспорта общего пользования, утвержденными приказом начальника Белорусской железной дороги от 20.12.2016 № 376Н, к измерителю «вагоно-часы» относятся расходы, связанные с амортизацией вагонов и контейнеров.

Для определения критерия оценки расходов, связанных с нахождением локомотивов в движении, при выборе оптимального ПФП используем измеритель «локомотиво-час в движении», с которым связаны расходы на амортизацию локомотивов, работу локомотивной бригады, затраты на топливо и т.д.

Согласно приложению 2 к приказу от 20.12.2016 № 376Н, величина расходной ставки одного вагоно-часа (далее – ваг.ч) составляет 1,33 руб.; величина расходной

ставки одного локомотиво-часа в движении – 499,32 руб. в тепловозной тяге и 447,63 руб. – в электровозной. Таким образом, стоимость 1 часа движения локомотива в тепловозной тяге эквивалентна стоимости 375 ваг.ч, в электровозной – 336 ваг.ч.

Для оценки целесообразности использования при разработке ПФП критерия минимизации затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении, рассмотрим направление А–D, на котором расположены четыре сортировочные станции. В рассматриваемом примере расстояния между станциями равны и составляют 120 км; экономия при проследовании сортировочной станции без переработки  $T_{эк}$  (или затраты на переработку  $T_{пер}$ ) составляет 5,0 ваг.ч; затраты, связанные с накоплением состава поезда  $cm = 600$  ваг.ч.

Рассмотрим случай, когда мощность всех струй вагонопотока равна и составляет 50 вагонов. Сведения о направлении А–D приведены на рисунке 1.

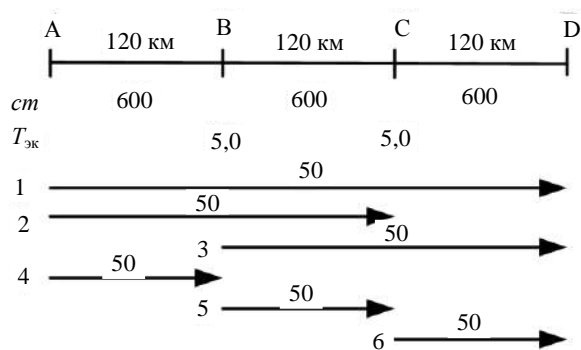


Рисунок 1 – Характеристика направления А–D

Для определения оптимального ПФП используем метод абсолютного расчета, предусматривающий выполнение вычислений для всех практически осуществимых вариантов плана формирования. В рассматриваемом примере является возможным выделение трех сквозных струй (А–D, А–С, В–D) вагонопотока в самостоятельные назначения, что означает необходимость расчета затрат для восьми вариантов плана формирования. На рисунке 2 приведен граф, на котором отмечены возможные варианты плана формирования поездов.

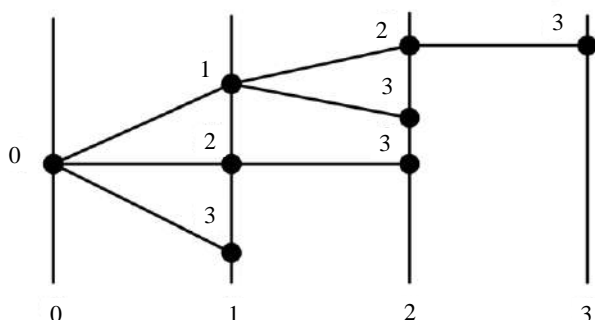


Рисунок 2 – Граф вариантов ПФП для направления А–D

Рассмотрим каждый из показанных выше вариантов и сравним затраты, связанные с накоплением составов поездов  $cm$  и с переработкой вагонов на сортировочных станциях  $nT_{пер}$ . Так, при реализации варианта ПФП, предусматривающего следование всех вагонов в участковых поездах (вариант «0»), затраты на накопление составов поездов на участки А–В, В–С, С–D составят  $\sum cm = 3 \cdot 600 = 1800$  ваг.ч; затраты, связанные с переработкой вагонов на

сортировочных станциях,  $\sum nT_{пер} = (50 + 50 + 50 + 50) \times 5,0 = 1000$  ваг.ч, а общие затраты  $B_{общ} = 1800 + 1000 = 2800$  ваг.ч.

В случае реализации варианта ПФП «0–1» в самостоятельное назначение выделяется струя вагонопотока № 1 (А–D), остальные вагоны доставляются участковыми поездами А–В, В–С, С–D. Затраты, связанные с накоплением составов поездов, составят  $\sum cm = 4 \cdot 600 = 2400$  ваг.ч, затраты, связанные с переработкой вагонов (переработкой струи А–С на станции В, струи В–D – на станции С)  $\sum nT_{пер} = 2 \cdot 5,0 \cdot 50 = 500$  ваг.ч, общие затраты  $B_{общ} = 2400 + 500 = 2900$  ваг.ч.

Результаты аналогичных расчетов для всех возможных вариантов плана формирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение вариантов ПФП для направления А–D

| Вариант ПФП | $\sum cm$ , ваг.ч | $\sum nT_{пер}$ , ваг.ч | $B_{общ}$ , ваг.ч |
|-------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| 0           | 1800              | 1000                    | 2800              |
| 0–1         | 2400              | 500                     | 2900              |
| 0–1–2       | 3000              | 250                     | 3250              |
| 0–1–2–3     | 3600              | 0                       | 3600              |
| 0–1–3       | 3000              | 250                     | 3250              |
| 0–2         | 2400              | 750                     | 3150              |
| 0–2–3       | 3000              | 500                     | 3500              |
| 0–3         | 2400              | 750                     | 3150              |

Таким образом, при использовании традиционных методов расчета наименьшие затраты обеспечиваются при доставке всех вагонов на станции назначения участковыми поездами.

Исследование, выполненное в 2015 году на участке Минск – Орша, показало, что даже в пределах одного участка скорости грузовых поездов могут значительно отличаться в зависимости от их категории. Так, в октябре 2015 года средняя участковая скорость сквозного поезда  $v_{скв}$ , следующего в направлении Минск – Орша, составила 53,2 км/ч; средняя скорость участкового поезда  $v_{уч}$  – 45,0 км/ч. На направлении Орша – Минск средние участковые скорости сквозных и участковых поездов составили соответственно 54,7 и 49,2 км/ч.

В связи с вышеизложенным, при разработке плана формирования целесообразным является введение дополнительного параметра – критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. В этом случае оптимальный план формирования может отличаться от плана формирования, разработанного по традиционным методам.

Используя данные о длине участков направления А–D, рассчитаем среднее время проследования каждого из участков участковым поездом  $t_{уч}$  и сквозным поездом  $t_{скв}$ . Экономия времени при следовании вагонов и локомотивов в составе сквозных поездов  $\Delta t_{скв}$  будет определяться по формуле

$$\Delta t_{скв} = t_{уч} - t_{скв} = \frac{L_{уч}}{v_{уч}} - \frac{L_{уч}}{v_{скв}}. \quad (1)$$

Приходящуюся на один вагон экономию затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах

$R$  в приведенных вагоно-часах (далее – пр. ваг.ч) можно вычислить при помощи формулы

$$R = \Delta t_{\text{скв}} k_{\text{лок}} \frac{1}{m} + \Delta t_{\text{скв}} = \Delta t_{\text{скв}} \left( \frac{k_{\text{лок}}}{m} + 1 \right), \quad (2)$$

где  $k_{\text{лок}}$  – коэффициент приведения локомотиво-часов экономии к вагоно-часам;  $m$  – средний состав следующего по участку поезда, ваг.

Определим значение параметра  $R$  при пропуске вагонов и локомотивов в сквозных поездах по различным участкам направления А–D.

Для расчетов принимаем, что средняя скорость участковых поездов  $v_{\text{уч}}$  составляет 45,0 км/ч, а скорость сквозных поездов  $v_{\text{скв}}$  превышает её на 5,0 % и составляет 47,25 км/ч. Средний состав поезда, следующего по направлению А–D, принимаем равным 60 вагонам.

Для того чтобы привести локомотиво-часы экономии к вагоно-часам, учитываем, что на рассматриваемом направлении применяется тепловозная тяга. Коэффициент приведения  $k_{\text{лок}}$  в этом случае составит 375.

Результаты расчета параметра  $R$  сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Определение параметра  $R$  для различных участков направления А–D

| Показатель                  | Участок |      |      |
|-----------------------------|---------|------|------|
|                             | А–С     | В–D  | А–D  |
| Длина участка, км           | 240     | 240  | 360  |
| $t_{\text{уч}}$ , ч         | 5,33    | 5,33 | 8,00 |
| $t_{\text{скв}}$ , ч        | 5,08    | 5,08 | 7,62 |
| $\Delta t_{\text{скв}}$ , ч | 0,25    | 0,25 | 0,38 |
| $R$ , пр. ваг.ч.            | 1,84    | 1,84 | 2,76 |

Для струи вагонопотока мощностью  $n$  экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах  $Rn$  составит

$$Rn = \Delta t_{\text{скв}} \left( \frac{k_{\text{лок}}}{m} + 1 \right) n. \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что значение параметра  $Rn$  возрастает при увеличении мощности струи вагонопотока, а также при увеличении длины участка, по которому следует поезд. В то же время значение параметра снижается при увеличении среднего состава обращающихся поездов, поскольку в этом случае для организации пропуска вагонопотока по участку потребуются меньшее число локомотивов.

Проиллюстрируем эти выводы на примере струи вагонопотока А–D.

Данные о влиянии изменения среднего состава поезда  $m$  на значение параметра  $Rn$  сведены в таблицу 3 и по ним построен рисунок 3.

Таблица 3 – Определение влияния изменения среднего состава поезда  $m$  на значение параметра  $Rn$

| $m$ , ваг. | $R$ , пр. ваг.ч | $Rn$ , пр. ваг.ч |
|------------|-----------------|------------------|
| 40         | 3,95            | 198              |
| 48         | 3,36            | 168              |
| 56         | 2,93            | 147              |
| 64         | 2,61            | 131              |
| 72         | 2,37            | 118              |
| 80         | 2,17            | 108              |

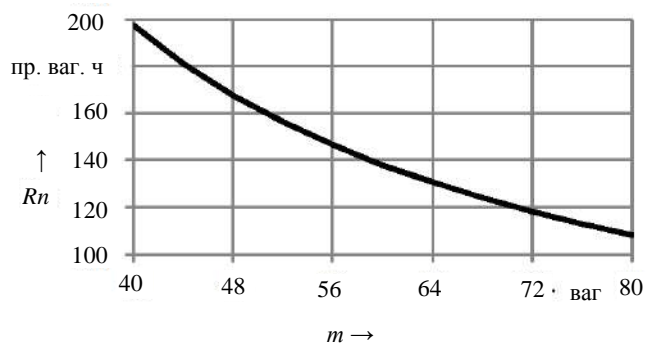


Рисунок 3 – Влияние изменения среднего состава поезда  $m$  на значение параметра  $Rn$

Рисунок 3 показывает, что значение параметра  $Rn$  обратно пропорционально среднему составу грузового поезда, следующего по рассматриваемому участку.

В таблице 4 приведены результаты расчета влияния изменения мощности струи вагонопотока  $n$  на величину параметра  $Rn$  и по ним построен график, приведенный на рисунке 4.

Таблица 4 – Определение влияния изменения мощности струи вагонопотока  $n$  на значение параметра  $Rn$

| $n$ , ваг. | $R$ , пр. ваг.ч | $Rn$ , пр. ваг.ч |
|------------|-----------------|------------------|
| 50         | 2,76            | 138              |
| 70         |                 | 193              |
| 90         |                 | 249              |
| 110        |                 | 304              |
| 130        |                 | 359              |
| 150        |                 | 414              |

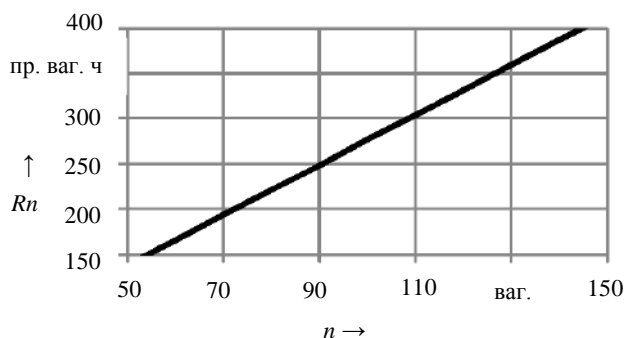


Рисунок 4 – Влияние изменения мощности струи вагонопотока  $n$  на значение параметра  $Rn$

Из рисунка 4 следует, что при увеличении мощности струи вагонопотока экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах возрастает линейно.

Результаты расчета влияния длины участка  $l_{\text{уч}}$  на величину параметра  $Rn$  приведены в таблице 5 и по ним построен рисунок 5.

Таблица 5 – Определение влияния длины участка  $l_{\text{уч}}$  на значение параметра  $Rn$

| $l_{\text{уч}}$ , км | $\Delta t_{\text{скв}}$ , ч | $R$ , пр. ваг.ч | $Rn$ , пр. ваг.ч |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| 60                   | 0,06                        | 0,46            | 23               |
| 120                  | 0,13                        | 0,92            | 46               |
| 180                  | 0,19                        | 1,38            | 69               |
| 240                  | 0,25                        | 1,84            | 92               |
| 300                  | 0,32                        | 2,30            | 115              |
| 360                  | 0,38                        | 2,76            | 138              |

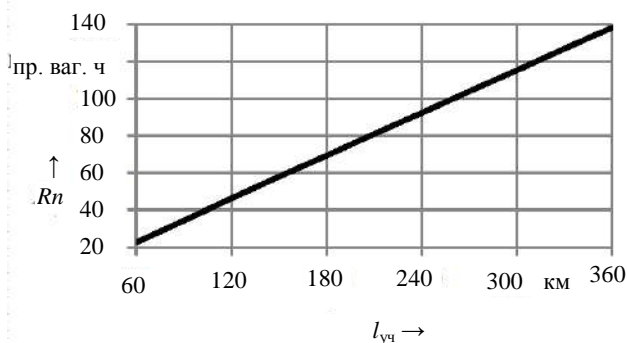


Рисунок 5 – Влияние длины участка  $l_{уч}$  на величину параметра  $Rn$

Рисунок 5 показывает, что при увеличении длины участка экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах  $Rn$  возрастает.

Используем параметр  $Rn$  при расчете оптимального плана формирования поездов для направления А–D.

Для варианта ПФП «0–1» параметр  $Rn$  будет равен

$$Rn = \left( \frac{360}{45} - \frac{360}{47,25} \right) \cdot \left( \frac{375}{60} + 1 \right) \cdot 50 = 138 \text{ пр. ваг.ч.}$$

Результаты расчетов параметра  $Rn$ , а также общих затрат  $B_{общ}$  для всех вариантов плана формирования сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Сравнение вариантов ПФП для направления А–D при использовании параметра  $Rn$

| Вариант    | При использовании традиционного метода расчета | При использовании параметра $Rn$ |             |
|------------|--|----------------------------------|-------------|
|            | $B_{общ}$ , ваг.ч                              | $Rn$                             | $B_{общ}$   |
|            |  | пр. ваг.ч                        |             |
| 0          | 2800   | 0                                | 2800        |
| <b>0–1</b> | <b>2900</b>                                    | <b>138</b>                       | <b>2762</b> |
| 0–1–2      | 3250   | 230                              | 3020        |
| 0–1–2–3    | 3600   | 322                              | 3278        |
| 0–1–3      | 3250   | 230                              | 3020        |
| 0–2        | 3150   | 92                               | 3058        |
| 0–2–3      | 3500   | 184                              | 3316        |
| 0–3        | 3150   | 92                               | 3058        |

Выполненные расчеты показали, что наименьшие затраты обеспечиваются при выделении в самостоятельное назначение струи № 1 (А–D).

Для оценки эффекта от использования при разработке ПФП критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах выполним аналогичные расчеты в случаях, если струи вагонопотока имеют большую мощность  $n$ , а также при большей разнице между скоростями участковых и сквозных поездов  $\Delta v$ . В таблице 7 приведены оптимальные варианты ПФП, рассчитанные с использованием традиционного и предлагаемого методов, а также экономия приведенных вагоно-часов  $\Delta B_{общ}$ , получаемая при использовании предлагаемого метода расчета.

Получено 21.06.2017

**V. Ya. Negrey, K. M. Shkurin.** The development of the one-group train formation plan calculation theory.

The most important principles of the traditional methods of the calculation of train formation plan are considered. The use of the additional parameter in the development of train formation plan – «the criterion of cost saving by moving rolling stock in through-trains» – is justified. The influence of various factors on cost saving by moving rolling stock in through-trains is analyzed.

Таблица 7 – Выбор оптимального варианта ПФП

| $\Delta v$ , % | $n$ , ваг. | Выбор варианта ПФП традиционным методом |                       | Выбор варианта ПФП с учетом параметра $Rn$ |                       | $\Delta B_{общ}$ , пр. ваг.ч |
|----------------|------------|---|-----------------------|--|-----------------------|------------------------------|
|                |            | оптимальный                             | $B_{общ}$ , пр. ваг.ч | оптимальный                                | $B_{общ}$ , пр. ваг.ч |                              |
| 5              | 50         | 0                                       | 2800                  | 0–1  | 2762                  | 38                           |
|                | 75         | 0–1                                     | 2943                  | 0–1  | 2943                  | 0                            |
|                | 100        | 0–1                                     | 3124                  | 0–1–2–3                                    | 2956                  | <b>168</b>                   |
| 10             | 50         | 0                                       | 2800                  | 0–1  | 2636                  | 164                          |
|                | 75         | 0–1                                     | 2755                  | 0–1–2–3                                    | 2677                  | 78                           |
|                | 100        | 0–1                                     | 2873                  | 0–1–2–3                                    | 2370                  | 503                          |
| 15             | 50         | 0                                       | 2800                  | 0–1  | 2522                  | 278                          |
|                | 75         | 0–1                                     | 2583                  | 0–1–2–3                                    | 2276                  | 307                          |
|                | 100        | 0–1                                     | 2643                  | 0–1–2–3                                    | 1835                  | <b>808</b>                   |

Из таблицы 7 видно, что при разнице между скоростями участковых и сквозных поездов в 5 % и мощности струй вагонопотока, равной 100 вагонов, при использовании предлагаемого метода подтверждается целесообразность выделения в самостоятельные назначения струй вагонопотока № 1, 2, 3 (А–D, А–С, В–D), тогда как при использовании традиционного метода обосновывается только целесообразность выделения струи вагонопотока № 1 (А–D). При этом расчет оптимального варианта ПФП с учетом параметра  $Rn$  обеспечивает экономию  $\Delta B_{общ} = 168$  пр. ваг.ч.

При увеличении мощности струй вагонопотока и разницы между скоростями участковых и сквозных поездов эффект от использования предлагаемого метода возрастает. Так, при мощности струй вагонопотока, равной 100 вагонов, и  $\Delta v = 15$  % он достигает 808 пр. ваг.ч.

Исходя из вышеизложенного, после расчета оптимального плана формирования поездов традиционным методом предлагается выполнять проверку маломощных струй вагонопотоков, не выделенных в самостоятельные назначения, с использованием критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. Использование указанного дополнительного критерия может подтвердить целесообразность выделения таких струй вагонопотоков в самостоятельные назначения, что обеспечит значительное сокращение эксплуатационных расходов.

#### Список литературы

- 1 Акулиничев, В.М. Организация вагонопотоков / В. М. Акулиничев. – М. : Транспорт, 1979. – 224 с.
- 2 Вдовин, А. Н. На основе имитационного моделирования / А. Н. Вдовин, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 3. – С. 37–41.
- 3 Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методы / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1988. – 206 с.
- 4 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов / П. С. Грунтов [и др.]; под ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.
- 5 Некрашевич, В. И. Управление эксплуатацией локомотивов / В. И. Некрашевич, В. И. Апатцев. – М. : РГОТУПС, 2004. – 257 с.
- 6 Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.