

УДК 656.222.3

В. Я. НЕГРЕЙ, доктор технических наук, С. В. ДОРОШКО, старший преподаватель, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## РАСЧЕТНЫЕ ВАГОНОПОТОКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ

Приводится анализ существующей методики выбора плановых вагонопотоков при расчете плана формирования поездов. Предлагается более эффективная процедура расчета струй вагонопотока на основе математического ожидания вероятностной модели.

По мере развития теории и практики расчета плана формирования поездов, который лежит в основе модели распределения сортировочной работы между станциями, подходы к выбору расчетных вагонопотоков неоднократно менялись. В соответствии с этим менялись и рекомендации по распределению сортировочной работы между станциями, эффективности маршрутизации вагонопотоков. Сегодня большинство предложений можно свести в следующие группы:

а) разработка двух вариантов плана формирования – на минимальные потоки каждого назначения (базовый вариант ПФП) и на средние суточные потоки, с указанием порядка перехода с одного варианта на другой (предложение проф. И. И. Васильева);

б) назначение ПФП на минимальные потоки, с учетом возможности продления движения маршрутов за станцию назначения, указанную в основном ПФП;

в) в основу расчетов принимать минимальные потоки, а при выборе оптимального ПФП руководствоваться лишь необходимым условием выгоды выделения назначения (проф. И. И. Васильев);

г) составление ПФП на минимальные и на максимальные суточные потоки (проф. В. А. Сокович, В. В. Повороженко);

д) при разработке ПФП необходимо исходить из средних потоков, а постоянные поезда назначать по минимальным потокам (предложение НИИЖТа);

е) ПФП должен составляться на основе средних плановых вагонопотоков, разработанных на период его действия, с выделением для сезонных грузов объема и сроков увеличенных перевозок (чл.-кор. АН СССР А. П. Петров).

Преимущества и недостатки каждого из подходов были тщательно проанализированы на рубеже 50-х годов чл.-кор. АН СССР А. П. Петровым и его учениками.

Исследования по этой проблеме, выполненные в последние десятилетия, не изменили выводов чл.-кор. АН СССР А. П. Петрова, и сегодня на практике используется последний вариант, который рекомендует вести расчеты на средние плановые вагонопотоки. Об этом свидетельствует принятая в последней редакции «Инструкции по организации вагонопотоков...» концепция выбора расчетных вагонопотоков [2].

За период с 1950 г. по настоящее время выполнены значительные исследования, которые позволяют отметить, что теоретический анализ и решение этого важнейшего вопроса системы организации перевозок были выполнены при достаточно жестких ограничениях и до-

пущениях, которые не в полной мере учитывают реальные условия работы железнодорожных станций. Во-первых, вероятностный характер колебаний транспортных потоков представлен детерминированной моделью, хотя многочисленные исследования, выполненные в БелГУТе, НИИЖТе, МГУПСе, НИИЖТе, ПГУПСе, Харьковской государственной Академии железнодорожного транспорта, ДГУЖТе и других организациях, убедительно доказали вероятностную природу транспортных потоков, а главное, разработаны адекватные методы ее описания. Во-вторых, вывод о целесообразности расчета ПФП на основе безошибочного прогноза средних вагонопотоков [5]. Исследования автора, а также работы [1, 3, 6, 7] показали, что особенно в условиях рыночной экономики выполнить прогноз эталонных значений вагонопотоков без ошибки невозможно. Последнее обстоятельство имеет особое значение в условиях рыночной экономики.

В-третьих, большинство теоретических построений базировалось на концепции независимости стабильности струи от ее мощности, а также независимости критерия оптимизации от структуры вагонопотоков.

В-четвертых, выводы были сделаны в предположении, что структура перевозимых грузов не влияет на принятие окончательного решения.

Поэтому перечисленные выше методологические ограничения, положенные в основу выбора расчетных вагонопотоков, не гарантируют в современных условиях получение оптимальных решений и требуют выполнения дополнительных исследований по анализируемой проблеме.

Для более полного представления о существе анализируемых теоретических исследований приведем их основные моменты.

Выделение назначения выгодно, если

$$N = \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{эк}}}, \quad (1)$$

где  $N$  – суточный вагонопоток данного назначения;  $T_{\text{нак}}$  – вагоно-часы накопления за сутки;  $t_{\text{эк}}$  – экономия времени в часах, достигаемая при выделении назначения.

Обозначим в соответствии с [5] отношение минимального вагонопотока струи к среднему через  $\alpha$  ( $\alpha = N_{\text{min}}/\bar{N}$ ). Тогда ПФП, рассчитанные по минимальным  $N_{\text{min}}$  и средним  $\bar{N}$  потокам, будут совпадать при соблюдении следующих условий:

$$\alpha \bar{N} \geq \frac{Cm}{t_{\text{эк}}}; \quad \bar{N} \leq \frac{2Cm}{t_{\text{эк}}}. \quad (2)$$

При соблюдении условий (2) может оказаться выгодным выделение нового назначения плана формирования поездов. Объединяя два условия, можно записать

$$\frac{2Cm}{t_{\text{ЭК}}} \geq \bar{N} \geq \frac{Cm}{\alpha t_{\text{ЭК}}}. \quad (3)$$

Согласно [5], дополнительные потери вагоно-часов при ориентировке на минимальные потоки вместо средних, будут иметь место, если

$$\frac{Cm}{\alpha t_{\text{ЭК}}} \geq \bar{N} \geq \frac{Cm}{t_{\text{ЭК}}}. \quad (4)$$

Кроме этих условий чл.-кор. АН СССР А. П. Петров допускает, что:

- 1) по обоим вариантам можно исключить одинаковые затраты вагоно-часов на накопление одного назначения по ст. А и ст. Б, на пропуск транзитных поездов;
- 2) все суточные потоки можно перегруппировать в ряд, изменение величин в котором происходит по закону прямой линии.

При таких ограничениях рекомендуется находить наиболее вероятные значения вагонопотока в интервалах ( $N_{\min}, \bar{N}$ ) и ( $\bar{N}, N_{\max}$ ) по формулам

$$\bar{N}_{\min} = (\bar{N} + N_{\min}) / 2 = (1 + \alpha) \bar{N} / 2. \quad (5)$$

$$\bar{N}_{\max} = (\bar{N} + N_{\max}) / 2 = (3 - \alpha) \bar{N} / 2. \quad (6)$$

В этом случае затраты вагоно-часов в зависимости от изменения вагонопотока от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$  приходятся в среднем на назначение для всего плана формирования. Максимальные потери при этом возникают при  $\bar{N}$ , немного не достигающем величины  $T_{\text{нак}} / (\alpha t_{\text{ЭК}})$  или  $Cm / (\alpha t_{\text{ЭК}})$ , которые приближаются к величине

$$\bar{N} t_{\text{ЭК}} - T_{\text{нак}} = \frac{T_{\text{нак}}}{\alpha t_{\text{ЭК}}} t_{\text{ЭК}} - T_{\text{нак}} = T_{\text{нак}} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) \quad (7)$$

и гиперболически увеличиваются с уменьшением  $\alpha$ . Согласно вышесказанному, чем больше отклонение минимального потока от среднего, тем большими будут и потери при расчете плана формирования на минимальные потоки.

Учитывая, что величина  $\bar{N}$  для одного назначения может колебаться от  $T_{\text{нак}}/t_{\text{ЭК}}$  до  $2T_{\text{нак}}/t_{\text{ЭК}}$ , то средние потери вагоно-часов в процентах при составлении плана формирования по минимальным вагонопотокам вместо средних и введении дополнительных поездов тех же назначений в случае роста вагонопотоков, для всего плана формирования или в среднем на одно назначение, могут быть представлены в виде

$$\frac{\frac{1}{2} T_{\text{нак}} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) \left( \frac{T_{\text{нак}}}{\alpha t_{\text{ЭК}}} - \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} \right)}{T_{\text{нак}} \left( \frac{2T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} - \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} \right)} \cdot 100 = 50 \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2. \quad (8)$$

График вышеприведенной зависимости приведен на рисунке 1.

Кроме того, в данной ситуации не учтены потери на дополнительную переработку вагонов, которые могут весьма значительно увеличить затраты. Этих потерь можно избежать при разработке плана формирования на минимальные потоки и только непрерывной корректировкой плана формирования, что практически неосуществимо.

Согласно [5], при определении количества дней в течение года, когда возникнет необходимость корректировать план формирования, рассчитываемый на минимальные и средние значения вагонопотоков при оптимальном режиме формирования поездов, план, составленный на средние потоки, также не всегда будет оптимальным в случае их увеличения или сокращения.

Дополнительная экономия при этом может быть достигнута:

$\bar{N}$  – в дни сокращения вагонопотока – при значениях  $\bar{N}$  от  $T_{\text{нак}} / t_{\text{ЭК}}$  до  $T_{\text{нак}} / (\alpha t_{\text{ЭК}})$ ;

$\bar{N}$  – в дни возрастания вагонопотока – при значениях  $\bar{N}$  от  $2T_{\text{нак}} / [(2 - \alpha)t_{\text{ЭК}}]$  до  $2T_{\text{нак}} / (\alpha t_{\text{ЭК}})$ .

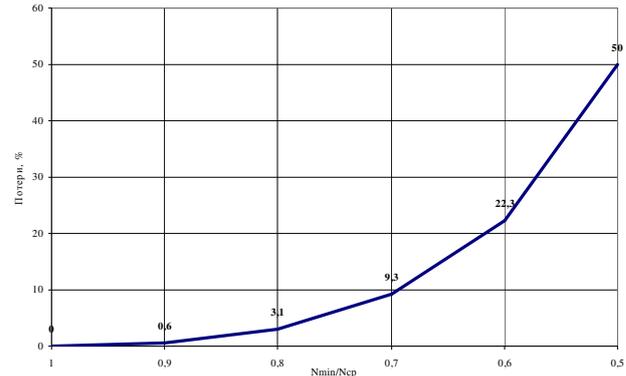


Рисунок 1 – Зависимость потерь вагоно-часов от  $\alpha$  ( $N_{\min}/\bar{N}$ ) при составлении плана формирования на минимальные потоки вместо средних

Средняя затрата вагоно-часов  $B_{\text{ср}}$  с учетом экономии при условии, что с поездами дополнительного назначения отправится половина потока  $N_{\max}$ , которая пройдет станцию без переработки, сэкономив  $N_{\max} t_{\text{ЭК}} / 2$  вагоно-часов, будет определяться из выражения

$$B_{\text{ср}} = 2T_{\text{нак}} - \frac{N_{\max} t_{\text{ЭК}}}{2}. \quad (9)$$

В общем виде для  $\bar{N}$  вагонопотока, изменяющегося от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$ , средневзвешенная суточная затрата вагоно-часов от  $T_{\text{нак}}/t_{\text{ЭК}}$  до  $T_{\text{нак}}/(\alpha t_{\text{ЭК}})$ , определяется из выражения

$$B_{\text{ср.вз}} = \frac{N_{\max} - \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}}}{N_{\max} - N_{\min}} T_{\text{нак}} + \frac{\frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} t_{\text{ЭК}} \frac{\frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} + N_{\min}}{2}. \quad (10)$$

В этой зависимости доля дней, когда оптимальным будет план, рассчитанный на минимальные вагонопотоки, потребует корректировки:

$$\Delta_{\min} = \frac{N_{\max} - \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}}}{N_{\max} - N_{\min}} = \frac{(2 - \alpha) - \frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}} N}}{2(1 - \alpha)}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{нак}}$  – затраты вагоно-часов, исключая одинаково повторяющиеся по всем вариантам.

Доля дней, когда оптимальный план, составленный на средние вагонопотоки, потребует корректировки:

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} = \frac{\frac{T_{\text{нак}}}{t_{\text{ЭК}}} - \alpha}{2(1 - \alpha)}. \quad (12)$$

По вышеприведенным формулам построены зависимости, приведенные на рисунке 2.

Анализ рисунка 2 показывает, что при расчете плана формирования на минимальные вагонопотоки в отличие от средних, количество дней корректировки возрастает в 2 раза.

Средняя затрата вагоно-часов в период действия плана формирования, составленного на среднее значение вагонопотока, составит

$$B_{cp}(\bar{N}) = t_{эк} \frac{\frac{T_{нак}}{t_{эк}} + N_{min}}{2}. \quad (13)$$

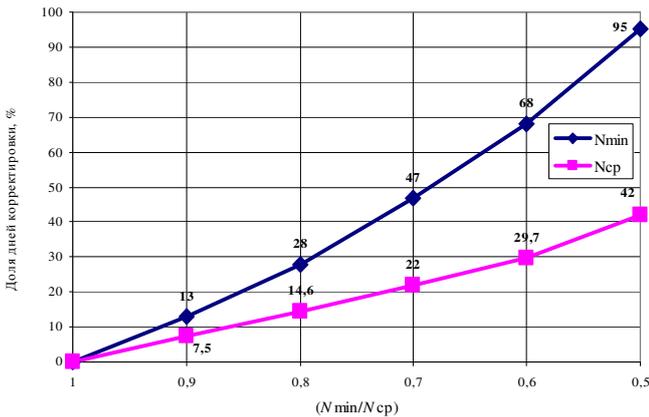


Рисунок 2 – Зависимость числа дней корректировки плана формирования от α

При изменении  $\bar{N}$  до  $N_{max}$ , в общем случае – от  $\frac{2T_{нак}}{(2-\alpha)t_{эк}}$  до  $2T_{эк} / t_{эк}$  средневзвешенные затраты вагоно-часов составят

$$B_{cp.вз}(N_{max}) = \frac{\frac{2T_{нак}}{N_{max}} - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} T_{нак} + \frac{N_{max} - \frac{2T_{нак}}{N_{max}}}{N_{max} - N_{min}} \left( 2T_{нак} - t_{эк} \frac{N_{max} + \frac{2T_{нак}}{N_{max}}}{2 \cdot 2} \right) \quad (14)$$

Величина  $\Delta_{опт}$ , входящая в зависимость (15), при значениях от  $T_{нак} / t_{эк}$  до  $T_{нак} / (\alpha t_{эк})$  представляется как доля дней, когда план формирования будет оптимальным и в корректировке не нуждается, независимо от того, составлен он на минимальные или средние вагонопотоки, и имеет вид

$$\Delta_{опт} = \frac{\frac{2T_{нак}}{t_{эк}} - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} = \frac{\frac{2T_{нак}}{t_{эк}} - \alpha}{2(1-\alpha)}. \quad (15)$$

При изменении вагонопотока в пределах от  $\frac{2T_{нак}}{(2-\alpha)t_{эк}}$  до  $2T_{нак} / t_{эк}$ , т. е. от  $\bar{N}$  до  $N_{max}$ , оптимальный план формирования потребует корректировки

$$\Delta_{опт}(N_{max}) = \frac{N_{max} - \frac{2T_{нак}}{t_{эк}}}{N_{max} - N_{min}} = \frac{(2-\alpha) - \frac{2T_{нак}}{t_{эк} \bar{N}}}{2(1-\alpha)}. \quad (16)$$

Затраты вагоно-часов при среднем и максимальном значениях вагонопотока, равном  $(N_{max} + 2T_{нак} / t_{эк}) / 2$  будут равны

$$B(\bar{N}, N_{max}) = 2T_{нак} - t_{эк} \frac{N_{max} + 2N_{нак} / t_{эк}}{2 \cdot 2}. \quad (17)$$

Принятые в исследованиях чл.-кор. АН СССР А. П. Петрова допущения (5) и (6) справедливы только для равномерного закона распределения колебаний вагонопотока. Однако такое допущение является весьма приближенным и не соответствует реальным условиям колебания транспортного спроса.

Неравномерность перевозок грузов в течение года зависит от ряда причин, таких как сезонность производства и потребления отдельных видов продукции, открытие и закрытие навигации на водных путях, ввод в эксплуатацию новых предприятий, неритмичность выполнения плана производства отдельными предприятиями, климатические особенности экономических районов, колебания погрузки и выгрузки по отдельным дням, нерегулярность работы морских портов и др.

На эксплуатационную работу и на техническое оснащение железных дорог чрезвычайно важное значение оказывает влияние неравномерности вагонопотоков при оптимизации ПФП, т. е. от решения задачи распределения сортировочной работы зависит правильное определение потребной пропускной способности участков и станций, а также перерабатывающей способности сортировочных и грузовых устройств на станциях и многое другое. Так как на основе расчетных вагонопотоков проектируется предстоящее развитие всех необходимых устройств железной дороги, а следовательно, и расчет размеров инвестиций. Учет неизбежных колебаний в этом случае также важен, как и точное прогнозирование предстоящих объемов работы. Завышенная степень неравномерности приведет к излишней затрате средств, а недоучет – к затруднениям в освоении предстоящих перевозок, нерациональному использованию подвижного состава.

Не менее ощутимо влияет неравномерность перевозок и на размеры перевозочных средств, необходимых для освоения заданных объемов работы. Потребность в вагонном парке находится в прямой зависимости от размеров работы. Поэтому даже временное повышение объема перевозок влечет за собой увеличение потребности в вагонах.

Значительное влияние на точность расчета оптимального ПФП оказывают ошибки прогнозирования среднесуточных потоков, которые связаны с несовершенством системы прогнозирования эталонов. Обычно предполагается, что объем перевозок между отдельными станциями изменяется пропорционально объему перевозок между соответствующими дорогами [5]. Такой подход является грубым приближением к действительности и приводит к значительным ошибкам, которые достигают по отдельным струям 23–47 %. Например, для среднесетевых условий абсолютные размеры ошибки прогноза мощности струй достигают 35–150 вагонов. Расчеты показали, что суточные колебания размера струй вагонопотока и ошибки прогноза приводят к большим отклонениям расчетных значений потоков от их действительных значений. Исследования, приведенные в [6], а также наблюдения автора за колебаниями мощности назначений ПФ и их обработка методами математической статистики показали, что суммарное распределение суточных колебаний струй вагонопотоков с достаточной для практических целей точностью (при  $\bar{N} \geq 120$  ваг./сут) описывается нормальным законом

распределения, а при меньших значениях – нормальным или законами Эрланга или Пуассона.

Доказано, что суточные колебания струй ПФП в большинстве случаев описываются нормальным законом распределения или по терминологии, принятой в [6]

$$f(N) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(N-\bar{N})^2}{2\sigma^2}}, \quad (18)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,

$$\sigma = a_i \bar{N}^{b_i}, \quad (19)$$

$a_i, b_i$  – эмпирические коэффициенты для  $i$ -го рода груза.

Систематизация статистического материала, собранного за период с 1990 по 2013 гг. на сети железных дорог Республики Беларусь и России, показала, что:

– наблюдается устойчивая закономерность снижения относительных размеров колебаний при увеличении интенсивности транспортного потока;

– размах колебаний транспортного потока зависит от структуры грузовых потоков, из которых он формируется, а также условий формирования. Поэтому при равных значениях мощности двух струй, абсолютные отклонения от среднесуточных размеров могут существенно отличаться друг от друга;

– между транспортными потоками, сформированными из разных категорий грузов, существует корреляционная связь, степень которой зависит от экономического района, где расположены линейные участки железнодорожной сети, сортировочные, участковые, грузовые и портовые станции.

Обработка результатов наблюдений по родам груза, в соответствии с принятой классификацией, позволила получить численную оценку коэффициентов, используя которые можно определять расчетные плановые значения вагонопотоков при составлении плана формирования поездов на Белорусской железной дороге.

Поэтому величину среднего квадратического отклонения рекомендуется определять по формуле

$$\sigma = a_i \bar{N}^{b_i}. \quad (20)$$

Коэффициент вариации для  $i$ -го рода груза

$$\gamma_i = a_i \bar{N}^{b_i-1}, \quad (21)$$

где  $a_i, b_i$  – эмпирические коэффициенты для  $i$ -го рода груза. Значения коэффициентов приведены в таблице 1.

Для практических расчетов величины мощности струи в зависимости от интенсивности вагонопотока и рода перевозимого груза рекомендуется пользоваться данными таблиц 1 и 2.

Таблица 1 – Расчетные параметры прогнозных функций

Род груза	Среднее квадратическое отклонение, $\sigma$		Коэффициент вариации, $\gamma$	
	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$
Каменный уголь и кокс	1,224	0,660	1,224	-0,340
Нефтяные	1,260	0,658	1,260	-0,342
Руда	1,293	0,657	1,293	-0,343
Черные металлы	1,249	0,652	1,249	-0,348
Лесные	1,232	0,676	1,232	-0,324
Минеральные строительные	1,393	0,653	1,393	-0,347
Химические и минеральные удобрения	1,289	0,652	1,289	-0,348
Хлебные	1,420	0,662	1,420	-0,338
Прочие	1,302	0,701	1,502	-0,299

Расчеты авторов позволили сделать вывод, что в результате суточных колебаний и ошибок прогноза действительные значения вагонопотоков отличаются от среднесуточных плановых на 18–350 %, а разница между максимальным и минимальным значениями мощности струи в отдельные сутки достигает 50–600 вагонов и в ряде случаев значительно превосходит среднее значение. Такие значительные колебания струй вагонопотоков приводят к отклонениям критерия оптимальности ПФП от его расчетного значения, сильно деформируют принятое решение.

Если обозначить границу перехода от одного варианта к другому через  $N_{гр}$ , то средний размер струи в пределах от  $N_{min}$  до  $N_{гр}$  и от  $N_{гр}$  до  $N_{max}$  (рисунок 3) будет определяться по формулам

$$\bar{N}_1 = \frac{\int_{-\infty}^{N_{гр}} N f(N) dN}{\int_{-\infty}^{N_{гр}} f(N) dN}, \quad \bar{N}_2 = \frac{\int_{N_{гр}}^{+\infty} N f(N) dN}{\int_{N_{гр}}^{+\infty} f(N) dN}. \quad (22)$$

Если колебания мощности струи описываются нормальным законом распределения, то

$$\bar{N}_1 = \bar{N} - \frac{\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{v^2}{2}} dV}, \quad \bar{N}_2 = \bar{N} + \frac{\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{v^2}{2}} dV}, \quad (23)$$

где  $x$  – нормированная величина, равная  $(N_{гр} - \bar{N}) / \sigma$ .

Количество дней в году, когда мощность струи будет превышать критическое значение, составит

$$r_2 = \int_{N_{кр}}^{\infty} f(N) dN. \quad (24)$$

После подстановки исходных данных

$$r_2 = 365 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{200}^{\infty} e^{-\frac{v^2}{2}} dV = 365 \cdot 0,295 = 108 \text{ сут.}$$

По аналогии, количество суток в году, когда мощность струи будет меньше критической

$$r_1 = 365 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{N_{кр}} f(N) dN. \quad (25)$$

Доля дней, когда оптимальным будет второй вариант, с выделением сквозного назначения

$$\Delta_{m2} = \frac{\frac{365}{\sqrt{2\pi}} \int_{N_{гр}}^{+\infty} e^{-\frac{v^2}{2}} dV}{365}. \quad (26)$$

По аналогии

$$\Delta_{m1} = \frac{\frac{365}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{N_{гр}} e^{-\frac{v^2}{2}} dV}{365}. \quad (27)$$

Таблица 2 – Значения среднего квадратического отклонения,  $\sigma$

Среднесуточная интенсивность потока, ваг/сут	Род груза								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	5,59	5,73	5,87	5,61	5,84	6,27	5,78	6,52	6,54
20	8,84	9,05	9,25	8,81	9,33	9,85	9,09	10,31	10,63
40	13,96	14,27	14,59	13,84	14,91	15,49	14,28	16,32	17,28
60	18,25	18,54	19,05	18,03	19,62	20,19	18,60	21,35	22,99
80	22,07	22,52	23,01	21,75	23,83	24,36	22,44	25,86	28,10
100	25,57	26,08	26,64	25,15	27,71	28,18	25,96	29,94	32,86
120	28,84	29,41	30,03	28,33	31,34	31,74	29,23	33,78	37,34
140	31,93	32,55	33,24	31,32	34,78	35,11	32,32	37,41	41,50

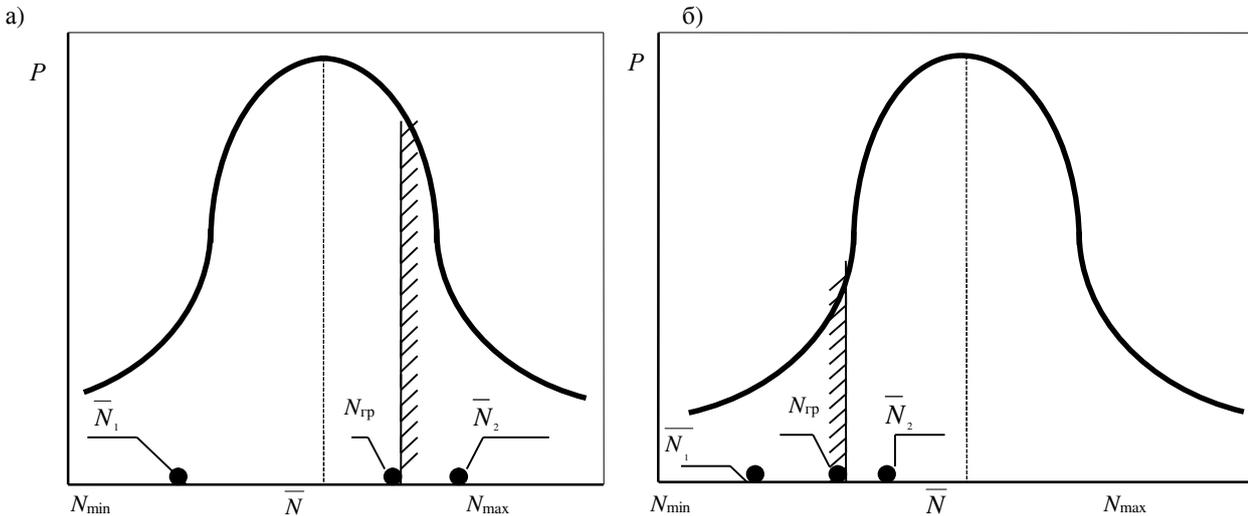


Рисунок 3 – Определение значения мощности струи вагонопотока в зависимости от  $N_{гр}$

Очевидно, что если расчет ПФП вести на среднюю величину потока, то в качестве оптимального варианта будет принят план, приведенный на рисунке 4 б, так как  $539 < 180 \cdot 3,0$ , т. е.  $539 < 540$ .

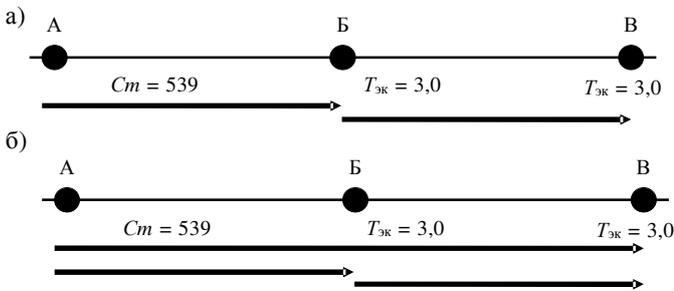


Рисунок 4 – Оптимальный вариант ПФП при изменении значений  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$

Для оценки погрешности расчетов по методике [5], используя полученные формулы, а также правило «трех сигм» при  $\bar{N} = 180$  и  $N_{гр} = 200$  ваг. находим для нормального закона распределения мощности струй вагонопотоков

$$N_{\min} = \bar{N} - 3\sigma; \quad N_{\min} = 180 - 3 \cdot 37,7 = 66,9 \text{ ваг.}$$

По формуле А. П. Петрова

$$\alpha = N_{\min} / \bar{N} = 66,9 / 180 = 0,37.$$

Используя выражения (5) и (6), получим

$$\bar{N}_{\min} = [(1 + 0,37)/2] \cdot 180 = 123,3;$$

$$\bar{N}_{\max} = [(3 - 0,37)/2] \cdot 180 = 236,7.$$

В соответствии с вероятностной концепцией расчета, используя зависимости (20), (23), при  $\bar{N} = 180$  ваг.,  $N_{гр} = 200$  ваг. получим

$$\sigma = 1,224 \cdot 180^{0,66} = 37,7 \text{ ваг.};$$

$$x = (200 - 180) / 37,7 = 0,54 \text{ ваг.};$$

$$\bar{N}_1 = 180 - [(37,7 / \sqrt{2} \cdot 3,14) e^{-0,1405} / 0,705] = 153,9 \text{ ваг.};$$

$$\bar{N}_2 = 180 + (37,7 / 0,3467 / 0,295) = 206,1 \text{ ваг.}$$

Размер ошибок, в результате принятого допущения

$$\Delta_{\min} = [(123,3 - 153,9) / 153,9] \cdot 100 \% = -19,9 \%;$$

$$\Delta_{\max} = [(236,7 - 206,1) / 206,1] \cdot 100 \% = 14,8 \%.$$

Еще большие ошибки в определении  $\bar{N}_{\min}$  и  $\bar{N}_{\max}$  имеют место при ассиметричных распределениях колебаний суточной мощности струй вагонопотоков. Такая ситуация, как показали исследования на станциях железных дорог стран СНГ, имеет при малых значениях струи вагонопотока, то есть в большинстве сегодняшних ситуаций. В частности, если распределение колебаний мощности струи описывается законом Пуассона

$$f(N) = \frac{\bar{N}^N}{N!} e^{-\bar{N}}. \quad (28)$$

Для этого закона распределения колебаний мощности струи

$$\bar{N}_{\min} = \sum_{N_{\min}}^{\bar{N}} N \frac{\bar{N}^N}{N!} e^{-\bar{N}}, \quad \bar{N}_{\max} = \sum_N^{N_{\max}} N \frac{\bar{N}^N}{N!} e^{-\bar{N}}. \quad (29)$$

Например, если  $\bar{N} = 10$  ваг., то

$$\bar{N}_{\min} = 0,0005 \cdot 1 + 0,0023 \cdot 2 + \dots + 0,125 \cdot 10 = 4,6 \text{ ваг.};$$

$$\bar{N}_{\max} = 10 + (0,1137 \cdot 11 + 0,0948 \cdot 12 + \dots + 0,0001 \cdot 24) = 15,4 \text{ ваг.}$$

По формулам (5) и (6) при рекомендуемом значении

$\alpha = 0,8 \bar{N}_{\min} = 9$  ваг., а  $\bar{N}_{\max} = 11$  ваг.

Погрешность расчета наиболее вероятных значений вагонопотока в интервалах от  $N_{\min}$  до  $\bar{N}$  и от  $\bar{N}$  до  $N_{\max}$  составит  $\Delta_{\min} = 95,6 \%$ , а  $\Delta_{\max} = 28,6 \%$ .

Указанные погрешности расчетов автоматически перенесены и в формулы для расчета количества дней в году, когда понадобится корректировать распределение сортировочной работы между станциями при построении его на минимальные и средние потоки.

Период корректировки плана формирования, построенного на средние вагонопотоки, будет равен

$$\Delta T = \int_{\frac{C_T}{t_{\text{эк}}}}^{\frac{C_T}{\tilde{\alpha} t_{\text{эк}}}} \frac{C_T}{2(1-\tilde{\alpha})} d\bar{N} + \int_{\frac{2C_T}{(2-\tilde{\alpha})t_{\text{эк}}}}^{\frac{2C_T}{t_{\text{эк}}}} \frac{(2-\tilde{\alpha}) - \frac{C_T}{\bar{N}}}{2-\tilde{\alpha}} d\bar{N}, \quad (30)$$

где  $\tilde{\alpha}$  – коэффициент, значения которого зависят от уровня колебаний транспортного спроса,

$$\tilde{\alpha} = \frac{\bar{N} - 3\sigma}{\bar{N}}. \quad (31)$$

Используя выражение (19) и выполнив преобразование, получим для симметричных распределений

$$\tilde{\alpha} = \frac{\bar{N} - a\bar{N}^b}{\bar{N}} = 1 - 3a\bar{N}^{b-1} = 1 - 3\gamma. \quad (32)$$

После решения (30) определяется период корректировки ПФП (в долях), построенного на средние вагонопотоки:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{1}{2} - \frac{2,31g \left[ (1+3\gamma)^2 (1-3\gamma) \right]}{6\gamma}. \quad (33)$$

Аналогично установлен период корректировки ПФП при его расчете на минимальные потоки:

$$\Delta T_{\min} = \frac{3(1-\gamma)}{2(1-3\gamma)} - \frac{2,31g \frac{(1+3\gamma)^2}{1-3\gamma}}{6\gamma}. \quad (34)$$

В условиях колебаний транспортного спроса нецелесообразно строить ПФП на средние, ни тем более, минимальные потоки. Гораздо эффективнее эту процедуру выполнять на основе математического ожидания струи вагонопотока в диапазоне от  $N_{\min}$  до  $\bar{N}$ . Очевидно, что в этом случае

$$\tilde{\alpha}_y = \frac{\bar{N}_1}{\bar{N}}, \quad (35)$$

где  $\bar{N}_1$  – математическое ожидание мощности струи вагонопотока в диапазоне от  $N_{\min}$  до  $\bar{N}$ .

Для нормального закона распределения колебаний струй вагонопотока

$$\tilde{\alpha}_y = \frac{\bar{N}_1 - \frac{\sigma}{1,253}}{\bar{N}}. \quad (36)$$

Преобразуем (36), учитывая, что  $\sigma = \gamma\bar{N}$ :

$$\tilde{\alpha}_y = 1 - 0,798\gamma. \quad (37)$$

Период корректировки ПФП (в долях), ориентированный на математическое ожидание струи вагонопотока в зоне от  $N_{\min}$  до  $\bar{N}$ , равен

$$\Delta T_y = \frac{1}{2} - \frac{2,31g \left[ (1+0,798\gamma)^2 (1-798\gamma) \right]}{1,596\gamma}. \quad (38)$$

Исследования показали, что если расчет вести на основе математического ожидания потока в диапазоне от  $N_{\min}$  до  $\bar{N}$ , то существенно сокращаются потери вагоно-часов и повышается эффективность перевозочного процесса.

### Список литературы

- 1 **Негрей, В. Я.** Задачи совершенствования методики расчета плана формирования поездов / В. Я. Негрей, С. В. Дорошко // Межвуз. сб. науч. тр. по материалам Междунар. конф., посвященной 190-летию ун-та, 70-летию ф-та «Управление процессами перевозок» и 75-летию кафедры «Управление эксплуатационной работой». – СПб. : ПГУПС, 1999. – С. 22–24.
- 2 Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах СССР. – М. : Транспорт, 1984. – 256 с.
- 3 **Дорошко, С. В.** К вопросу оптимального распределения сортировочной работы между станциями полигона сети / С. В. Дорошко // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1992. – С. 93–97.
- 4 **Негрей, В. Я.** Новые подходы к распределению сортировочной работы между железнодорожными станциями / В. Я. Негрей, С. В. Дорошко // Тез. докл. по материалам Второй междунар. межвуз. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта». – М. : МГУПС, 1996. – С. 25–26.
- 5 **Петров, А. П.** План формирования поездов: Опыт, теория, методика расчетов / А. П. Петров. – М. : Трансжелдориздат, 1950. – 483 с.
- 6 **Правдин, Н. В.** Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, Н. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.
- 7 **Негрей, В. Я.** Распределение сортировочной работы в условиях колебаний вагонопотоков / В. Я. Негрей, Н. П. Негрей, С. В. Дорошко // Совершенствование технологии работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – С. 45–52.
- 8 Совершенствование системы распределения сортировочной работы на полигоне : отчет о НИР. Т I (договор Д/Ю 571 (2698) от 24.004.2002 г.) / рук. Н. В. Правдин; исполн.: М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев, В. Г. Гизатулина, И. А. Александрина, С. В. Дорошко. – Гомель : БелГУТ, 2003. 159 с.

Получено 25.11.2014

**V. Y. Negrey, S. V. Doroshko.** Estimated traffic volumes for the development of train formation plan.

An analysis of the existing procedures for the selection of planned traffic volumes in the calculation of the plan of formation of trains. Proposes a more efficient procedure for calculating the wagon flow jets perform based on the expectation of probabilistic models.