



УДК 656.2

В. А. Кудрявцев, А. А. СветашевПетербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОСТАВООБРАЗОВАНИЯ
НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ ОТПРАВЛЕНИИ
ПОЕЗДОВ ПО ТВЕРДОМУ ГРАФИКУ ДВИЖЕНИЯ**

Приводится анализ составообразования на сортировочной станции при накоплении составов и формировании поездов с отправлением их по твердому графику с целью установления зависимостей, позволяющих определить затраты вагоно-часов на накопление вагонов и обоснование условий применения твердого графика. Установлены различия процесса накопления вагонов при твердом и при гибком графике. С помощью моделирования составообразования по твердому графику рассчитаны и сопоставлены параметры для подтверждения правильности предлагаемой методики.

Твердый график, неполный твердый график, средняя величина состава, допустимое отклонение, затраты вагоно-часов, параметр накопления.

В последние годы развивается движение поездов по твердому графику, который предусматривает отправление грузовых поездов и прибытие их на станции назначения по фиксированным ниткам графика, увязанным по попутным техническим станциям на всем пути следования. Однако этот прогрессивный способ организации движения поездов применяется только для отдельных отправительских маршрутов, формируемых на грузовых станциях. Технические маршруты, формируемые на сортировочных станциях, не охвачены твердым графиком из-за специфики сортировочной работы. Возможность использования твердого графика для технических маршрутов впервые была рассмотрена в статье [2], выводы которой были основаны только на обработке статистических данных о вагонопотоках, поступающих на сортировочные станции, поэтому целесообразно продолжать исследования в этом направлении,

чтобы разработать теоретическую базу для принятия практических решений по использованию твердого графика в сфере технической маршрутизации.

В данной статье приведен анализ составообразования на сортировочной станции при накоплении составов и формировании поездов с отправлением их по твердому графику с целью установления зависимостей, позволяющих определить затраты вагоно-часов на накопление вагонов, и обоснования условий применения твердого графика.

**Анализ процесса составообразования
при отправлении поездов по твердому
графику**

Для сортировочной станции твердый график движения поездов предусматривает еже-

суточное отправление поездов отдельных назначений плана формирования каждые сутки в одно и то же время по фиксированным ниткам графика [2]. Однако при этом вследствие неравномерного поступления вагонов на путь накопления невозможно обеспечить накопление всех составов до максимально допустимой величины, как при гибком графике, поэтому средняя величина составов m будет меньше максимально допустимой по вместимости путей m_{\max} на определенное количество вагонов Δm . Минимально возможные размеры движения определяются по среднесуточной величине вагонопотока данного назначения $U_{\text{сут}}$ и величине m_{\max} :

$$N_{\min} = \frac{U_{\text{сут}}}{m_{\max}}, \text{ поездов.}$$

Размеры движения поездов, которые можно заложить в твердый график, определяются округлением N_{\min} в большую сторону:

$$N_{\text{гр}} = \lfloor N_{\min} \rfloor + 1, \text{ поездов,}$$

где $\lfloor N_{\min} \rfloor$ – целая часть величины N_{\min} , поездов.

Тогда среднее расчетное значение величины состава при твердом графике будет

$$m = \frac{U_{\text{сут}}}{N_{\text{гр}}}, \text{ ваг.,}$$

а величина отклонения от максимально допустимого значения –

$$\Delta m = m_{\max} - m, \text{ ваг.}$$

Минимально допустимая величина состава будет $m_{\min} = m - \Delta m$, ваг.

Таким образом, фактическое число вагонов в формируемых составах m_{ϕ} может меняться в диапазоне от m_{\min} до m_{\max} вагонов: $(m - \Delta m) \leq m \leq (m + \Delta m)$.

Так, если $U_{\text{сут}} = 320$ ваг., $m_{\max} = 70$ ваг., то $N_{\min} = \frac{320}{70} = 4,57$ ваг. и $\Delta m = 70 - 64 = 6$ ваг.,

а минимально допустимая величина состава $m_{\min} = m - \Delta m = 64 - 6 = 58$ ваг., т. е. число вагонов в составе колеблется от 58 до 70.

Если число накопленных на состав вагонов превышает m_{\max} , то избыток уходит в остаток и участвует в накоплении следующего состава. Если же число накопленных вагонов менее m_{\min} , то поезд отменяется и эти вагоны накапливаются для следующего поезда. При нарастании остатка и приближении его величины к значению m_{\min} может быть назначен дополнительный поезд.

Отмена и назначение поездов снижают процент выполнения твердого графика. При этом остаток от отмененного поезда распределяется по накоплению других поездов, повышая величину их состава и увеличивая ее среднее значение от расчетного m до фактического m_{ϕ} . В отсутствие отмен и назначений поездов реализуется полный (100%-ный) твердый график, при их наличии – неполный твердый график, качество которого характеризуется установленным процентом его выполнения. Поскольку фактическое окончание накопления состава может наступить ранее зафиксированного момента, не исключен простой накопленного состава в ожидании формирования или отправления. Этот простой не является непроизводительным, а обусловлен технологией.

Таким образом, можно выделить особенности процесса накопления вагонов при твердом графике, отличающие его от накопления при гибком графике:

- 1) момент окончания накопления состава определяется не количеством поступающих на путь накопления вагонов, а фиксированным временем отправления поезда;
- 2) для каждого поездного назначения однозначно определяется допустимое отклонение Δm от средней величины состава в большую и меньшую стороны;
- 3) средняя величина замыкающей группы равна среднему значению поступающей группы;
- 4) необходимость в отдельных случаях отмены графиковых поездов и назначения дополнительных;

5) наличие технологического простоя накопленного состава в ожидании формирования или отправления.

Определение среднесуточных затрат вагоно-часов на накопление составов

С учетом установленных особенностей накопления вагонов рассмотрим детальный усредненный график накопления вагонов при твердом графике движения поездов (рис. 1). Все параметры составообразования, использованные для построения графика, имеют средние значения. Поскольку окончание накопления определяется фиксированным моментом времени (а не накоплением до определенной величины состава), средняя величина замыкающей группы будет такой же, как всех остальных поступающих групп вагонов – $m_{гр}$. Средний период накопления состава T_n , с одной стороны, определяется числом графиковых ниток $N_{гр}$: $T_n = \frac{24}{N_{гр}}$, ч, с другой – сред-

ним числом n интервалов между поступлением групп вагонов i : $T_n = in$ ($n = \frac{m}{m_{гр}}$, где m –

среднее число вагонов в накопленных составах; $m_{гр}$ – среднее число вагонов в поступающей группе). Эти периоды накопления, хотя и имеют одну и ту же величину, могут быть сдвинуты друг относительно друга до значения i , поэтому среднюю величину сдвига можно принять равной $0,5i$.

Другие параметры, показанные на рисунке: $m_o = \frac{\sum ut_o}{24}$ – средняя величина остатка вагонов ($\sum ut_o$ – среднесуточные затраты вагоно-часов на накопление остатков); Δm – предельная величина возможных отклонений фактического числа вагонов в накопленных составах от среднего значения m_o ($\Delta m = m_{max} - m_o$).

Анализ графика показывает, что затраты вагоно-часов в период накопления T_n можно разбить на три составляющие:

1) от простоя поступающих на путь накопления групп вагонов величиной $m_{гр}$, за исключением последней группы, которая не про-

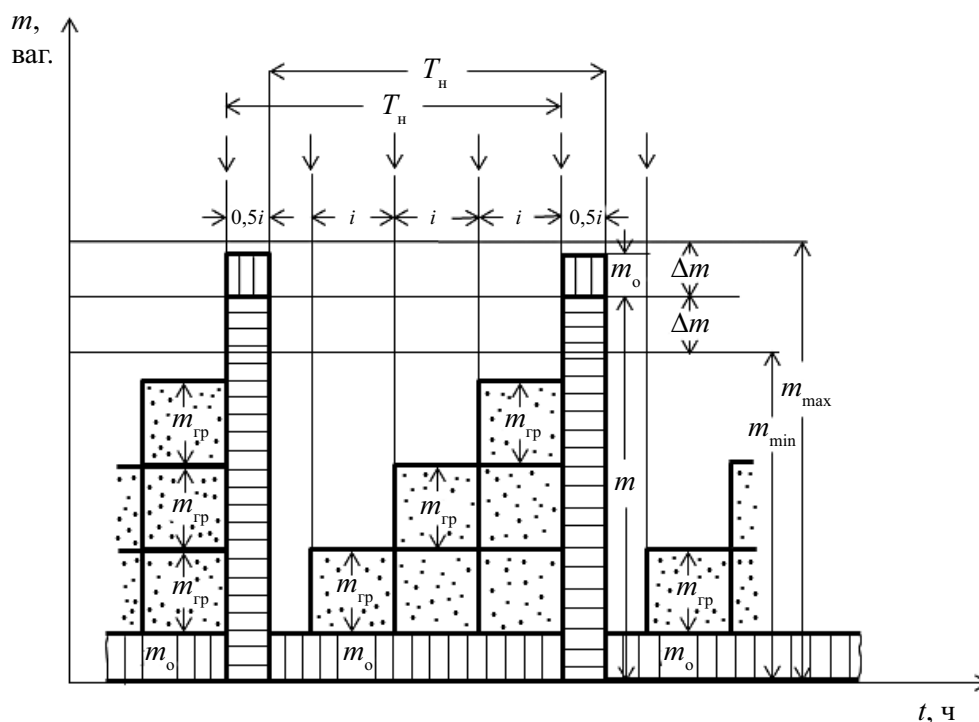


Рис. 1. Графическая схема накопления состава при средних значениях параметров составообразования

стаивает под накоплением. Эти затраты выражаются площадью ступенчатой фигуры, составленной из прямоугольников, площадь каждого из которых равна $m_{\text{гр}} i$. Число таких прямоугольников зависит от числа поступающих групп n и составляет $0,5n(n-1)$. При этом затраты вагоно-часов составят $ut_{\text{гр}} = 0,5n \times (n-1)m_{\text{гр}} i$. Подставляя значение $i = \frac{24}{N_{\text{гр}} n}$ ($N_{\text{гр}}$ – число фиксированных ниток твердого графика), получим

$$\begin{aligned} ut_{\text{гр}} &= 0,5n(n-1)m_{\text{гр}} \frac{24}{N_{\text{гр}} n} = \\ &= 12(n-1) \frac{m_{\text{гр}}}{N_{\text{гр}}} = \frac{12}{N_{\text{гр}}} (m_{\text{гр}} n - m_{\text{гр}}). \end{aligned}$$

Поскольку $m_{\text{гр}} n = m$, окончательно $ut_{\text{гр}} = \frac{12}{N_{\text{гр}}} (m - m_{\text{гр}})$, а среднесуточные затраты вагоно-часов –

$$\sum ut_{\text{гр}} = N_{\text{гр}} ut_{\text{гр}} = 12(m - m_{\text{гр}}); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2) \text{ от простоя остатка вагонов} - ut_{\text{о}} &= m_{\text{о}} T_{\text{н}} = \\ &= m_{\text{о}} \frac{24}{N_{\text{гр}}}. \end{aligned}$$

Среднесуточные затраты вагоно-часов

$$\sum ut_{\text{о}} = 24m_{\text{о}}; \quad (2)$$

3) от простоя накопленного состава в ожидании нитки графика (либо в сортировочном, либо на пути отправления) $ut_{\text{ож}} = m \cdot 0,5 \cdot i =$

$$\begin{aligned} &= 0,5m \frac{24}{N_{\text{гр}} n}. \text{ Подставив } \frac{m}{n} = m_{\text{гр}}, ut_{\text{ож}} = \\ &= \frac{12m_{\text{гр}}}{N_{\text{гр}}}, \text{ получим } ut_{\text{ож}} = \frac{12m_{\text{гр}}}{N_{\text{гр}}}. \end{aligned}$$

Среднесуточные затраты вагоно-часов

$$\sum ut_{\text{ож}} = N_{\text{гр}} ut_{\text{ож}} = 12m_{\text{гр}}. \quad (3)$$

Таким образом, среднесуточные затраты вагоно-часов на накопление вагонов с учетом

«обязательного» простоя накопленных составов будет

$$\begin{aligned} B &= \sum ut_{\text{гр}} + \sum ut_{\text{о}} + \sum ut_{\text{ож}} = \\ &= 12(m - m_{\text{гр}}) + 24m_{\text{о}} + 12m_{\text{гр}} = \\ &= 12(m - m_{\text{гр}} + m_{\text{гр}}) + 24m_{\text{о}} = \\ &= 12(m + 2m_{\text{о}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Параметр накопления

$$c = \frac{B}{m} = 12\left(1 + \frac{2m_{\text{о}}}{m}\right). \quad (5)$$

Таким образом, при отправлении поездов по твердому графику значительно увеличивается простой вагонов под накоплением за счет дополнительного простоя накопленного состава.

Однако рассмотренный график отражает ситуацию, когда число накопленных на состав вагонов $m_{\text{н}}$ попадает в диапазон $m \pm \Delta m$. В реальном процессе составообразования это число вагонов будет выходить за указанные пределы. В случае превышения верхней границы $m_{\text{н}} > m_{\text{max}} = m + \Delta m$ образуется остаток вагонов. Если число накопленных вагонов не достигает нижней границы $m_{\text{н}} < m_{\text{min}} = m - \Delta m$, то формирование поезда отменяется и все эти вагоны переходят в остаток, который в дальнейшем либо рассасывается по накопленным составам, увеличивая их вплоть до m_{max} , либо – при интенсивном подходе вагонов – возрастает до такой степени, что возникает необходимость назначения дополнительных (неграфиковых) поездов. В этом случае реализуется неполный твердый график, качество которого можно оценить процентом выполнения твердого графика [1].

Поскольку можно предположить, что число назначаемых дополнительных поездов будет меньше, чем число отмененных, увеличится среднее число вагонов в составе поезда и общее число поездов уменьшится по сравнению с расчетным графиковым. Также будет другое значение среднего остатка вагонов. Фактические значения этих параметров можно опре-

делить только в результате моделирования процессов поездообразования при твердом графике движения. Окончательные выводы по целесообразности использования твердого графика в рамках сортировочной станции можно будет сделать только имея результаты моделирования составаобразования.

Результаты моделирования составаобразования

В настоящее время на сортировочных станциях практически отсутствуют данные о составаобразовании и отправлении поездов по твердому графику, поэтому для получения таких статистических данных целесообразно использовать имитационное моделирование. С этой целью в качестве исходных использовали данные о реальном поступлении групп вагонов на путь накопления при расформировании поездов, т. е. число вагонов в поступающих группах и время их поступления отдельно по каждому поезвному назначению. Всего рассмотрели восемь назначений разной мощности с моделированием по шести значениям максимальной нормы состава. Суточный период в соответствии с числом формируемых поездов разделили на части, каждая из которых соответствовала периоду накопления составов. Предварительно расчетным путем получили значение Δm для каждого назначения. В соответствии с нормативом m_{\max} установили значение $m_{\min} = m_{\max} - 2\Delta m$ и среднюю величину состава $m = m_{\max} - \Delta m$. Далее по мере поступления групп вагонов на путь накопления имитировали образование составов посуточно в течение месячного периода.

В результате моделирования по каждому назначению установили следующие параметры:

- фактическое среднее значение величины состава m_{ϕ} ;
- фактическое среднее значение отклонения Δm_{ϕ} ;
- среднее значение остатка вагонов m_0 ;
- среднее значение суточных затрат на накопление B ;

• среднее значение параметра накопления c .

В качестве параметра, характеризующего каждое назначение, определили соотношение [3]

$$\gamma = \frac{m}{m_{\max}} = \frac{m}{m + \Delta m}.$$

Моделирование составаобразования показало большой разброс значений остатка вагонов при одном и том же значении γ . Процент отправления поездов по твердому графику для рассмотренных назначений оказался в диапазоне от 73 до 99% (табл. 1). Таким образом, в течение месяца ни одно назначение не вышло на 100%-ное отправление поездов по твердому графику. Это говорит о том, что для сортировочных станций характерен неполный твердый график, который обуславливается отменой графиковых поездов при накоплении состава менее нижней границы допустимого диапазона ($m_{\text{нак}} < m_{\min}$).

Из-за отмены поезда все накопленные вагоны переходят в остаток и участвуют в накоплении последующих составов. При большом избытке вагонов могут назначаться дополнительные (неграфиковые) поезда. Число дополнительных поездов всегда меньше числа отмененных за счет использования вагонов остатка в границах установленного диапазона величины формируемых составов: $m_{\min} \leq m_{\phi} \leq m_{\max}$. В результате число фактически сформированных поездов оказывается меньше расчетного: $N_{\phi} < N_{\text{гр}}$, поэтому возрастают значения среднего состава ($m_{\phi} > m$) и $\gamma_{\phi} > \gamma$. Одновременно снижается значение $\Delta m_{\phi} < \Delta m$, что сужает границы фактического диапазона величины формируемых поездов: $m_{\min}^{\phi} \leq m_{\phi} \leq m_{\max}$, где $m_{\min}^{\phi} = m_{\max} - 2\Delta m_{\phi}$.

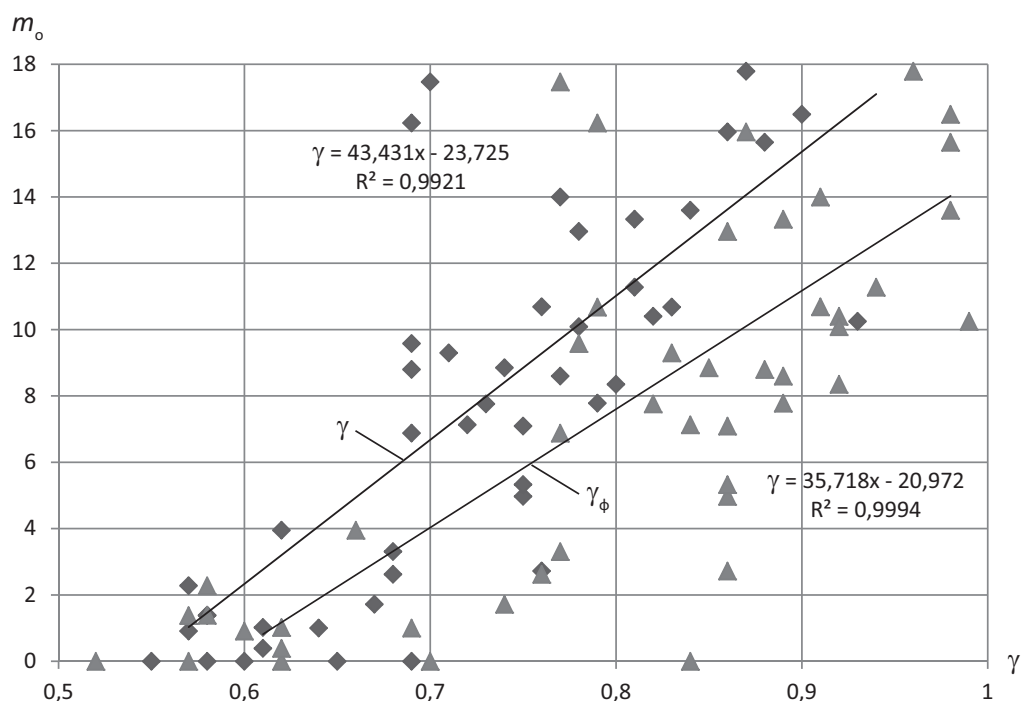
Анализ полученных данных позволил установить зависимость $m_0 = f(\gamma)$ как прямолинейную $m_0 = 41,64\gamma - 22,211$ (рис. 2), которую можно использовать для аналитического определения ориентированной величины среднего остатка.

ТАБЛИЦА 1. Диапазон отправления поездов по твердому графику

Диапазон %	Вагонопоток	m_{\max}	γ	% выполнения графика
71–80	U = 93	70	0,88	78
	U = 104	80	0,87	80
	U = 114	50	0,76	73
	U = 114	60	0,95	78
	U = 114	90	0,85	78
	U = 114	100	0,57	80
	U = 122	50	0,81	79
	U = 134	50	0,9	79
	U = 145	60	0,8	77
	U = 165	60	0,69	80
81–90	U = 93	50	0,93	82
	U = 93	60	0,77	83
	U = 93	80	0,77	84
	U = 93	90	0,69	89
	U = 104	50	0,7	84
	U = 104	70	0,75	83
	U = 104	90	0,58	84
	U = 104	100	0,69	87
	U = 114	70	0,82	82
	U = 114	80	0,71	85
	U = 122	60	0,68	82
	U = 122	80	0,76	85
	U = 122	90	0,68	88
	U = 134	60	0,75	81
	U = 134	70	0,64	88
	U = 134	80	0,84	83
	U = 134	90	0,75	83
	U = 134	100	0,67	88
	U = 145	50	0,72	81
	U = 145	70	0,69	82
	U = 145	90	0,81	87
	U = 145	100	0,73	85
	U = 155	50	0,78	82
	U = 155	60	0,86	88
	U = 155	70	0,74	81
	U = 155	80	0,65	87
	U = 155	100	0,78	87
	U = 165	50	0,83	83
U = 165	70	0,79	82	
U = 165	80	0,69	82	

Окончание табл. 1

Диапазон %	Вагонопоток	m_{\max}	γ	% выполнения графика
91–100	U = 93	100	0,62	93
	U = 104	60	0,58	97
	U = 122	70	0,58	98
	U = 122	100	0,61	97
	U = 145	80	0,60	91
	U = 155	90	0,60	96
	U = 165	90	0,61	93
	U = 165	100	0,52	99

Рис. 2. График зависимости остатка вагонов от γ и γ_{ϕ}

Так, безостаточное накопление составов можно обеспечить при значении $\gamma = 0,533 \times m_{\max}$. При этом число графиковых ниток более чем в два раза должно превышать число ниток гибкого графика при накоплении до максимальной величины состава. Понятно, что этот вариант практически неприемлем ввиду его нерентабельности. Для каждой сортировочной станции в зависимости от ее возможностей, а также от возможностей локомотивного парка и пропускной способности

прилегающих направлений, имеется зона рациональных значений γ , которые устанавливаются по максимально допустимым значениям среднего остатка m_0 и прогнозным значениям процента выполнения графика. Закономерностей соответствия значений γ и γ_{ϕ} проценту выполнения твердого графика не обнаружено. Основная масса рассмотренных значений (62,5%) характеризуется диапазоном значений $\gamma = 0,67 - 0,90$ и процентом выполнения графика 81–90% (табл. 2).

Следует иметь в виду, что фактические значения γ_{ϕ} при тех же значениях остатка m_o несколько больше, чем расчетные значения γ . Анализ полученных данных позволяет установить средний коэффициент увеличения $\alpha \approx 1,12$. Зависимость $m_o = f(\gamma_{\text{ср}})$ показана на рис. 2 штриховой линией $m_o = A\gamma_{\phi} - B$. Эта зависимость позволяет определить величину среднего остатка вагонов m_o непосредственно по фактическому значению γ_{ϕ} .

Из-за большого разброса усредненных значений остатка вагонов суточные затраты вагоно-часов на накопление вагонов целесообразно рассчитывать по формулам (1)–(5), используя установленные статистически фактические значения m_{ϕ} , $m_{\text{гр}}^{\phi}$ и m_o^{ϕ} . Для приближенных ориентировочных расчетов при определении остатка можно использовать установленные зависимости (рис. 2).

Помимо этого установлены аналитические зависимости среднесуточной величины затрат вагоно-часов на накопление $B = f(\gamma)$ (рис. 3) и параметра накопления $c = f(\gamma)$ (рис. 4).

При этом отклонение полученных по этим зависимостям значений от фактических составляет по B 2,65%, по c – 9,93%.

В табл. 3 приведены все расчеты значений B и c по всем суточным вагонопотокам, а также определен процент отклонения.

Заключение

Анализ процесса составообразования при отправлении поездов по твердому графику позволил установить аналитические формулы для определения среднесуточных затрат вагоно-часов накопления вагонов по отдельно-

ТАБЛИЦА 2. Диапазон значений величины γ и среднего остатка вагонов m_o

% выполнения	γ	m_o , ваг.	Отклонение
71–80	0,91–0,98	16,83–24,36	1,12
81–90	0,67–0,90	2,49–16,82	1,13
91–100	0,55–0,66	0–2,48	1,11
Итого			1,12

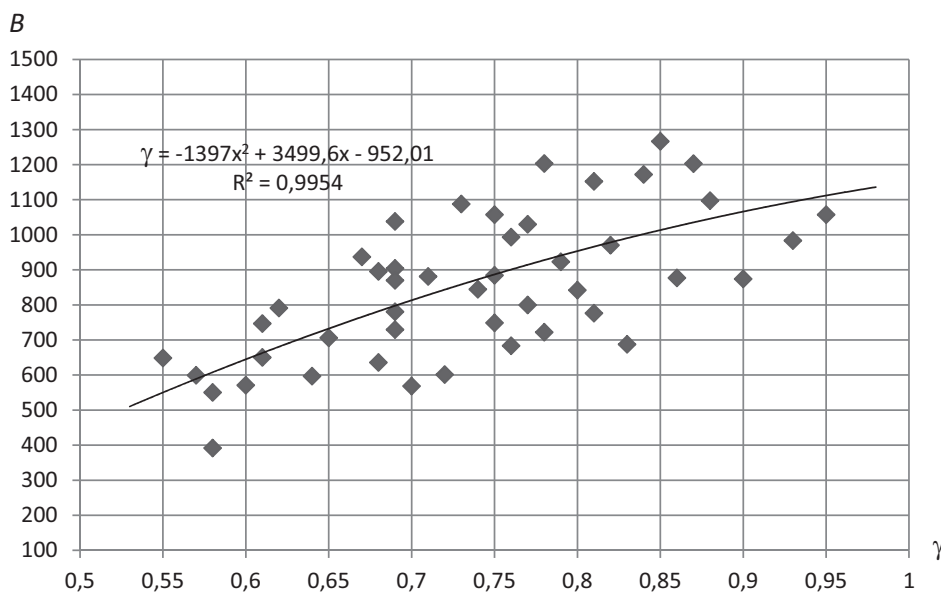


Рис. 3. Аналитическая зависимость затрат вагоно-часов $B = f(\gamma)$

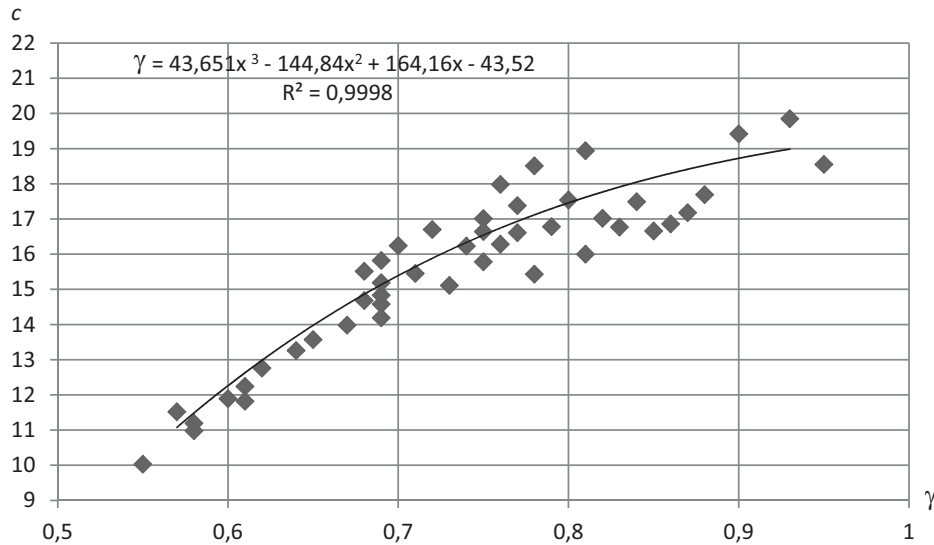
Рис. 4. Аналитическая зависимость параметра накопления $c = f(\gamma)$

ТАБЛИЦА 3. Расчет средних затрат вагоно-часов и параметра накопления

$U_{\text{сут}}$	93	104	114	122	134	145	155	165	Среднее отклонение	
$B_{\text{нак}}$	900,72	878,05	899,51	674,70	799,32	747,20	721,94	761,21	797,83	
$B_{\text{ож}}$	76,68	51,84	82,68	60,48	81,60	84,36	74,16	81,60	74,22	
$B_{\text{рас}}$	841,80	766,08	878,88	697,36	810,64	749,04	766,64	702,92	776,69	
$B_{\text{ф}}$	956,52	884,90	899,51	713,64	886,66	872,98	839,79	785,44	870,04	
Отклонение	58,92	111,97	20,63	-22,66	-11,52	-1,84	-44,7	58,29	21,14	
% отклонения	4,32	8,08	1,99	-3,52	-2,07	-0,12	-7,02	6,84	2,65	
γ	$\gamma_{\text{р}}$	0,78	0,70	0,78	0,69	0,76	0,73	0,73	0,69	0,73
	$\gamma_{\text{ф}}$	0,87	0,75	0,86	0,75	0,85	0,81	0,80	0,76	0,81
c	14,13	19,91	12,96	12,21	12,68	12,31	12,17	13,75	13,02	
$c_{\text{рас}}$	15,06	13,80	14,83	13,75	14,60	13,87	14,24	13,51	14,21	
$c_{\text{ф}}$	15,19	14,05	16,60	12,91	14,12	14,35	14,24	14,08	14,44	
Отклонение	-0,93	-0,10	-1,87	-1,55	-1,92	-1,56	-2,07	0,24	1,20	
% отклонения	-6,88	-0,94	-15,59	-12,60	-14,78	-13,15	-17,14	1,61	-9,93	

му назначению плана формирования поездов. При этом один из параметров этого процесса – средняя величина остатка вагонов после накопления составов – не может быть определен аналитическим путем.

Поскольку формирование поездов по твердому графику в настоящее время не распространено на сортировочных станциях, произведено моделирование этого процесса по реальным значениям параметров поступающего

вагонопотока, что позволило получить статистические данные, характеризующие составообразование, в том числе значения остатка вагонов.

Анализ результатов обработки статистических данных позволил установить прямолинейную зависимость $m_o = f(\gamma)$, которую можно использовать для аналитического определения ориентировочной средней величины остатка вагонов. Зная эту величину, а также отчетные значения средней величины поступающей группы вагонов m_ϕ и средней величины формируемых по данному назначению составов m , по предложенной формуле легко определить среднесуточные затраты вагоно-часов на накопление с учетом простоя составов в ожидании нитки графика.

Исследование показывает, что в условиях работы сортировочной станции очень трудно обеспечить выполнение твердого графика на 100%. Однако неполный твердый график вполне можно обеспечить. Его приемлемость

можно определить прогнозным процентом выполнения графика. Результаты исследования позволят уточнить расчеты по определению оптимального плана формирования поездов.

Библиографический список

1. Кудрявцев В. А. Определение суточных затрат вагоно-часов на накопление составов / В. А. Кудрявцев, Я. В. Кукушкина, Ш. М. Суюнбаев // Железнодорож. транспорт. – 2010. – № 3. – С. 29–31.
2. Кудрявцев В. А. Целесообразность использования твердого графика движения грузовых поездов / В. А. Кудрявцев, Ш. М. Суюнбаев // Сб. ст. ВТИ. – 2010. – № 18. – С. 145–149.
3. Суюнбаев Ш. М. Оперативное планирование эксплуатационной работы в условиях организации движения грузовых поездов по твердому графику / Ш. М. Суюнбаев // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 3. – С. 15–24.