

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОГРУППНЫХ СОСТАВОВ

Запропонована імітаційна модель процесу формування багатогрупних составів, яку можна рекомендувати для оперативного управління роботою станцій. Модель дозволяє знайти для конкретного составу оптимальний метод і схему формування при існуючому технічному оснащенні станції та підготувати план маневрової роботи.

Предложена имитационная модель процесса формирования многогруппных составов, которую можно рекомендовать для оперативного управления работой станций. Модель позволяет найти для конкретного состава оптимальный метод и схему формирования при существующем техническом оснащении станции и подготовить план маневровой работы.

There was suggested the simulating model of the multi-group trains make up process. This model can be recommended for operative control of the station operation. This model allows to find the optimal method and scheme of the making up the specific train, considering the existing quantity of the tracks, and create the plan of the shunting operations.

Концентрация маневровой работы по подборке групп местных вагонов по грузовым фронтам и грузам на несетевых сортировочных и участковых станциях приводит к необходимости формирования многогруппных составов в условиях недостаточного числа путей. Следует учитывать, что формирование составов, особенно многогруппных, является одним из наиболее трудоемких элементов процесса переработки вагонов на станциях и оказывает заметное влияние на сроки доставки грузов. В этой связи с целью уменьшения времени нахождения вагонов на станциях, снижения себестоимости перевозки грузов и повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта необходимо совершенствование процесса формирования многогруппных составов.

Актуальность проблемы подтверждается существованием значительного числа разных методов формирования многогруппных составов [1–5]. В опубликованных работах приводятся описания методов, как правило, без анализа и сравнительной оценки их эффективности; отсутствуют также рекомендации по выбору рационального метода формирования в конкретных условиях. В этой связи в настоящей статье поставлена задача исследования и оценки эффективности существующих методов формирования многогруппных составов с целью получения рекомендаций как для выбора технического оснащения сортировочных станций так и для оперативного управления технологическим процессом.

Для решения данной задачи была разрабо-

тана имитационная модель процесса формирования, которая позволяет определять его минимальную продолжительность при использовании различных методов формирования; в статье приведены результаты исследований, выполненных с использованием указанной модели.

Основной целью проведенных исследований являлось определение зависимостей продолжительности формирования от параметров составов для разных технических средств и методов формирования. Указанные зависимости необходимы для управления процессом формирования многогруппных составов в оперативных условиях. Кроме того, полученные в результате исследований рекомендации могут быть использованы при комплексном проектировании устройств для формирования составов с целью выбора рационального технического оснащения станций.

Для проведения исследований были выбраны пять известных методов формирования многогруппных составов: комбинаторный (КМ) [3], распределительный (РМ) [3], основной ступенчатый (ОСМ), двойной ступенчатый (ДСМ) и равномерного нарастания (МРН) [2].

Для представления разработанной модели формирования многогруппных составов введем некоторые определения. *Группой* являются вагоны состава, имеющие одно назначение; при этом каждому вагону группы присваивается номер  $g_i$ , выбор которого осуществляется по определенным правилам. *Метод* формирования  $M$  рассматривается как совокупность правил

сборки и сортировки групп вагонов состава по путям на отдельных этапах формирования. *Схемой* формирования состава  $\sigma$  некоторым методом называется порядок распределения его вагонов по путям на каждом этапе формирования; при этом схема формирования определяется множеством использованных номеров групп. *Множество схем* формирования для данного метода может быть получено при определенном варьировании нумерации  $g_i$  групп вагонов состава.

Принято, что перед началом формирования многогруппный состав с неупорядоченными вагонами, расположенными в порядке их поступления, находится на одном пути. После окончания формирования вагоны должны быть подобраны по группам, а группы в составе должны располагаться в заданном порядке.

Как показали исследования [3], при выборе метода и схемы формирования состава целесообразно заменить действительные номера групп вагонов  $g_i$  на логические номера (ЛНГ)  $\gamma_i$ , которые определяются с учетом начальной неупорядоченности отдельных вагонов этого состава. При этом число логических групп  $\theta$  в составе в среднем в два раза меньше, чем число действительных групп  $k$ , что позволяет существенно уменьшить объемы маневровой работы по формированию состава.

ЛНГ  $\gamma_i$ , присвоенный каждому вагону, используется для определения логического номера пути (ЛНП)  $\mu_i$ , на который следует направить этот вагон при сортировке на каждом этапе формирования.

Принято, что для формирования многогруппных составов используется сортировочное устройство (горка, вытяжной путь) и определенное число сортировочных путей  $m$ , которое не превышает  $\theta$  ( $m \leq \theta$ ).

Для формирования состава необходимо  $N$  этапов, число которых зависит от метода формирования, числа сортировочных путей  $m$  и числа групп  $\theta$  в неупорядоченном составе. При этом на каждом этапе формирования, при использовании любого метода выполняются две операции: сборки вагонов с  $m_{сб}$  путей и их сортировки на  $m_c$  путей.

Поскольку перед началом формирования вагоны состава находятся на одном из сортировочных путей, то на первом этапе  $m_{сб} = 1$ . На последнем  $N$ -м этапе вагоны должны быть собраны на одном пути ( $m_{сб} = 1$ ). На промежу-

точных этапах используемое число путей  $m$  зависит от метода формирования и от их различного числа  $m_{нал}$ .

Имитационная модель, разработанная для выполнения сравнительных исследований различных методов формирования, ориентирована на решение следующих задач:

- расчет времени формирования  $i$ -го состава при использовании некоторой схемы для выбранного метода  $M$ ;
- выбор оптимальной схемы  $\sigma$  формирования состава для метода  $M$ ;
- выбор оптимальной технологии формирования состава (выбор оптимальной схемы на множестве рассматриваемых методов).

Имитационная модель состоит из двух модулей. Первый из них позволяет для отдельного состава установить совокупность рейсов сборки и сортировки, необходимую для реализации некоторой схемы формирования многогруппного состава заданным методом. Второй модуль служит для расчета продолжительности формирования данного состава  $t_\phi$  при использовании заданных метода и схемы. С помощью двух указанных модулей осуществляется выбор оптимальной схемы формирования  $\sigma$  для каждого из рассматриваемых методов.

Процесс формирования многогруппного состава любым методом можно представить в виде последовательности  $K$  маневровых рейсов сборки и сортировки вагонов ( $R_1, R_2, \dots, R_K$ ). При этом каждый рейс, в зависимости от его специализации, можно представить как:

$$\text{– рейс сборки} \quad R_j^+ = (w_j, n_j^+), \quad (1)$$

$$\text{– рейс сортировки} \quad R_j^- = (w_j, n_j^-), \quad (2)$$

где  $w_j$  – номер сортировочного пути, на который выполняется  $j$ -й рейс;

$n_j^-, n_j^+$  – число вагонов, на которое изменяется маневровый состав, а также группа вагонов на пути  $w_j$  после выполнения рейса.

При этом, по завершении рейса сборки  $R_j^+$  число вагонов при локомотиве увеличивается на  $n_j^+$ , а на пути  $w_j$  – уменьшается на ту же величину.

После рейсов сортировки  $R_j^-$ , напротив, увеличивается число вагонов на пути  $w_j$  на величину  $n_j^-$ , и, соответственно, уменьшается

маневровый состав.

На каждом этапе формирования последовательно выполняется группа рейсов  $R^+$  сборки вагонов с  $m_{сб}$  путей, после которых собранные вагоны сортируют, используя определенное число рейсов  $R^-$ .

Список номеров сортировочных путей  $\bar{w}_S = (w_1, w_2, \dots, w_{m_{сб}})$ , с которых собирают вагоны на  $S$ -м этапе, определяются методом  $M$  формирования состава:

$$\bar{w}_S = f_M(S).$$

Пути назначения рейсов сортировки собранного состава определяются ЛНГ каждого вагона:

$$w_i = \Psi_M(\gamma_i, S), \quad i = 1, \dots, n_S, \quad S = 1, \dots, N,$$

где  $n_S$  – число вагонов в маневровом составе, сортируемом на  $S$ -м этапе;

$N$  – число этапов формирования состава.

После определения номеров путей назначения  $w_i$  для состава смежные вагоны, следующие на один путь, объединяются в отцепы с числом вагонов  $n_j^-$  (2).

Второй модуль на основе полученного множества рейсов  $R_j^\pm = (w_j, n_j^\pm)$ , определяет продолжительность процесса формирования состава, используя нормативы времени выполнения маневровых операций как на вытяжном пути, так и на горке; методика расчета детально рассмотрена в [3].

Как показал анализ методов формирования, число  $Z$  возможных схем формирования состава зависит от числа групп вагонов и числа используемых сортировочных путей. При этом для каждого метода существуют критические значения числа групп, при которых схема формирования состава является единственной. Эти значения определяются числом используемых путей, а для отдельных методов – числом этапов формирования.

Для методов КМ, РМ и МРН существует множество критических значений  $G_{m,N}$  числа групп:

$$G_{m,N} = \{G_{m,1}, G_{m,2}, \dots\}$$

Эти значения определяются для каждого  $m$  числом этапов формирования  $N$ , которое, в свою очередь, зависит от числа групп  $\theta$  в составе.

а) комбинаторный метод

$$G_{m,N} = F_{N+m+1}^{(m)}, \quad N = m, m+1, \dots,$$

где  $F^{(m)}$  – обобщенное число Фибоначчи порядка  $m$ ;

б) распределительный метод

$$G_{m,N} = m^{N-1}, \quad N = 2, 3, \dots;$$

в) метод равномерного нарастания

$$G_{m,N} = (m-1)N + 1, \quad N = 2, 3, \dots$$

При этом число этапов  $N$  определяется так, чтобы выполнялось условие:

$$G_{m,N} < \theta < G_{m,N+1}.$$

Для методов ОСМ и ДСМ для каждого  $m$  существует единственное критическое значение  $G_m$  поскольку число этапов  $N$  в этих методах фиксировано (для ОСМ  $N=3$ , для ДСМ  $N=4$ ).

а) основной ступенчатый метод

$$G_m = 0.5m(m+1),$$

б) двойной ступенчатый метод

$$G_m = m(m+1) - 1,$$

В случае совпадения числа групп  $\theta$  с одним из критических значений  $G$  существует единственная схема формирования состава. Однако, в большинстве случаев, когда  $\theta \neq G$ , число схем формирования  $Z$  может быть достаточно велико [3]:

$$Z = C_G^\theta = \frac{G!}{\theta!(G-\theta)!} \quad (3)$$

В этом случае появляется возможность оптимизировать процесс формирования состава за счет выбора схемы с минимальной его продолжительностью  $T_\phi$ . Выбор схемы можно осуществить путем полного перебора всех вариантов, когда число  $Z$  (3) невелико, и с помощью статистического подхода (случайная выборка  $n_0 = 299$  схем), когда  $Z > 299$  [3], то есть:

$$n_0 = \begin{cases} Z & \text{при } Z \leq 299, \\ 299 & \text{при } Z > 299. \end{cases} \quad (4)$$

Для методов КМ, РМ и МРН было установлено, что в некоторых случаях, когда число  $\theta$  близко к критическому значению  $G$ , целесообразно увеличить  $\theta$ , введя дополнительные фик-

тивные ЛНГ. Это позволит перейти к следующему критическому значению  $G$  и, в результате, существенно расширить множество возможных схем, среди которых может быть схема с минимальной продолжительностью формирования состава. Таким образом, в некоторых случаях искусственное увеличение числа  $\theta$ , позволяет уменьшить время  $T_\phi$  несмотря на увеличение при этом числа этапов  $N$  на единицу. Для методов ОСМ и ДСМ подобная возможность оптимизации времени формирования может быть достигнута за счет использования большего числа путей.

Для исследования процесса формирования многогруппных составов с помощью разработанной имитационной модели были подготовлены данные о потоках из 200 составов, которые различаются числом вагонов  $n$  ( $n = 10..40$ ); при этом число групп  $\theta$  в составе является случайным.

Прежде всего, были выполнены исследования и оценка эффективности выбора оптимальной схемы для каждого из рассматриваемых составов при заданных условиях формирования. Оценить указанный эффект можно относительной величиной размаха выборки  $n_0$  значений времени формирования  $\delta T_\phi$  для каждого состава:

$$\delta T_\phi = \frac{t_{\phi\max} - t_{\phi\min}}{t_{\phi\min}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $t_{\phi\max}, t_{\phi\min}$  – продолжительность формирования состава, соответственно, по лучшей и худшей из  $n_0$  схем выборки.

Величина  $\delta T_\phi$  для некоторого состава показывает, какое максимальное сокращение времени формирования  $t_\phi$  данного состава возможно при выборе наилучшей схемы.

Для примера на рис. 1 приведено распределение случайной величины  $\delta T_\phi$  для потока 200 составов из 35 вагонов при использовании комбинаторного метода; формирование осуществляется на вытяжном пути с использованием 4-х сортировочных путей.

При выборе для каждого состава оптимальной схемы формирования затраты времени будут минимальны. При формировании состава с использованием случайно выбранной схемы продолжительность формирования можно оценить ее средним значением:

$$\bar{t}_\phi = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} t_{\phi i}$$

Тогда относительный эффект от оптимизации схемы формирования можно определить как:

$$e = \frac{\bar{t}_\phi - t_{\phi\min}}{t_{\phi\max}} \cdot 100\% \quad (6)$$

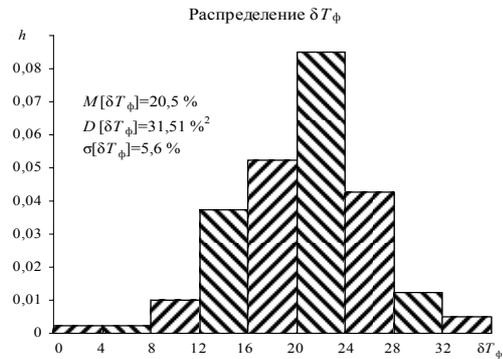


Рис. 1. Распределение  $\delta T_\phi$  при формировании комбинаторным методом составов из 35 вагонов на вытяжных путях с использованием 4-х путей

Как показали исследования, случайная величина  $\delta T_\phi$  имеет близкое к нормальному распределение; следовательно, среднюю величину  $\bar{t}_\phi$  можно приближенно найти как:

$$\bar{t}_\phi = \frac{t_{\phi\min} + t_{\phi\max}}{2} \quad (7)$$

Тогда, очевидно, что эффект от оптимизации схемы формирования  $e$  (6) составляет половину от относительного размаха  $\delta T_\phi$  (5).

Результаты оценки эффекта от поиска оптимальной схемы для рассматриваемых методов при формировании составов с числом вагонов  $n = 15, 25, 35$  и использовании  $m = 2, 3, 4$  путей и разных типов сортировочных устройств приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, оптимизация схемы формирования составов позволяет уменьшить его продолжительность на 5...20%. В этой связи в дальнейших исследованиях для каждого состава в качестве расчетного принималось минимальное время формирования, которое может быть достигнуто при заданных условиях и выборе оптимальной схемы.

Далее была выполнена сравнительная оценка эффективности рассматриваемых методов формирования. Как показали исследования, при

каждом сочетании параметров  $m$  и  $n$  существует метод  $\hat{M}(m,n)$ , частота  $f$  использования которого выше чем у остальных методов  $f_{\max} = f(\hat{M})$ . При этом на горках это, как правило, комбинаторный метод. На вытяжных путях наиболее часто использовались методы ДСМ, МРН и ОСМ; при этом выбор лучшего метода  $\hat{M}(m,n)$  определяется сочетанием параметров  $m$  и  $n$ .

Таблица 1

**Эффект  $e$  от оптимизации схем формирования составов**

Тип СУ	$n$	$m$	КМ	РМ	ОСМ	ДСМ	МРН	
Вытяжной путь	15	2	4,6	10,6	-	8,1	7,7	
		3	6,8	13,2	8,2	15,9	8,8	
		4	8,1	11,4	10,7	15,5	9,5	
	25	2	8,6	12,1	-	-	6,8	
		3	9,3	14,9	5,7	17,3	9,3	
		4	10,4	14,9	11,4	15,4	11,2	
	35	2	9,5	10,1	-	-	5,6	
		3	10,7	10,7	-	17,2	9,1	
		4	10,7	14,5	10,1	14,9	12,3	
	Горка	15	2	3,8	11,5	-	7,0	6,2
			3	5,4	13,5	10,9	13,9	11,8
			4	7,2	12,2	12,7	13,8	12,2
25		2	6,2	11,0	-	-	6,5	
		3	7,6	15,1	7,9	15,4	14,4	
		4	9,0	14,2	13,1	15,5	16,1	
35		2	6,2	8,4	-	-	5,8	
		3	7,3	9,5	-	15,2	17,1	
		4	7,5	11,7	12,2	15,3	18,8	

Как следует из табл. 2, максимальная частота  $f_{\max}$  (выделенные клетки) изменяется в достаточно широких пределах (от 26 до 88%), однако, она во всех случаях меньше 100%. Следовательно, не существует метода, который был бы лучшим для всех составов потока при любых заданных условиях формирования и параметрах составов. Отсюда, может быть сделан вывод о том, что для минимизации времени формирования составов на станции необходимо для каждого из них выбирать наилучшие метод и схему формирования.

Для оценки эффективности такого подхода было рассмотрено два возможных варианта организации формирования на станции. В первом варианте для каждого из составов определялись метод и схема формирования, обеспечивающие его минимальную продолжительность. Во втором варианте формирование всех составов потока осуществлялось одним и тем же методом и

без выбора наилучшей схемы; при этом время формирования принималось равным среднему из предельных для данного состава значений (7). По второму варианту расчеты были выполнены для всех пяти рассматриваемых методов.

Таблица 2

**Частота использования различных методов для формирования потока составов**

Тип СУ	$n$	$m$	КМ	РМ	ОСМ	ДСМ	МРН	
Вытяжной путь	15	2	14,9	9,6	-	19,3	<b>56,3</b>	
		3	19,6	4,4	4,4	<b>43,9</b>	27,6	
		4	23,9	13,7	14,9	<b>26,3</b>	21,1	
	25	2	21,0	11,8	-	-	<b>67,3</b>	
		3	7,4	9,0	5,5	<b>61,9</b>	16,2	
		4	9,0	13,6	<b>41,6</b>	11,4	24,4	
	35	2	15,8	4,0	-	-	<b>80,3</b>	
		3	14,0	1,8	-	<b>57,5</b>	26,8	
		4	3,8	5,8	<b>46,0</b>	8,5	35,9	
	Горка	15	2	27,4	4,2	-	<b>42,6</b>	25,7
			3	<b>45,9</b>	8,6	6,7	25,3	13,6
			4	<b>71,2</b>	7,0	7,8	8,3	5,7
25		2	<b>65,8</b>	9,8	-	-	24,5	
		3	<b>38,2</b>	8,3	5,1	32,8	15,6	
		4	<b>81,0</b>	2,5	8,4	5,7	2,5	
35		2	<b>77,5</b>	8,0	-	-	14,5	
		3	<b>54,6</b>	2,3	-	26,3	16,8	
		4	<b>87,7</b>	0,1	7,9	1,1	3,1	

Эффект от оптимизации процесса формирования составов оценивался относительной величиной  $\tau_M$  сокращения его продолжительности для каждого из методов:

$$\tau_M = \frac{\bar{t}_{\phi, M} - \bar{t}_{\text{опт}}}{\bar{t}_{\phi, M}} \cdot 100\%,$$

где  $\bar{t}_{\phi, M}$  – среднее время формирования состава заданного потока методом  $M$  без выбора наилучшей схемы для каждого из составов;

$\bar{t}_{\text{опт}}$  – то же, при условии выбора наилучшего метода и схемы формирования для каждого из составов.

Величины  $\tau_M$  были определены для всех пяти рассматриваемых методов при разном техническом оснащении станций (тип сортировочного устройства, число путей  $m$ ) и различном числе вагонов в составах  $n$ ; результаты расчетов приведены в табл. 3.

Как видно из полученных данных, оптимизация процесса формирования в зависимости от условий позволяет сократить затраты времени на его реализацию от 10 до 30 %.

Таблица 3

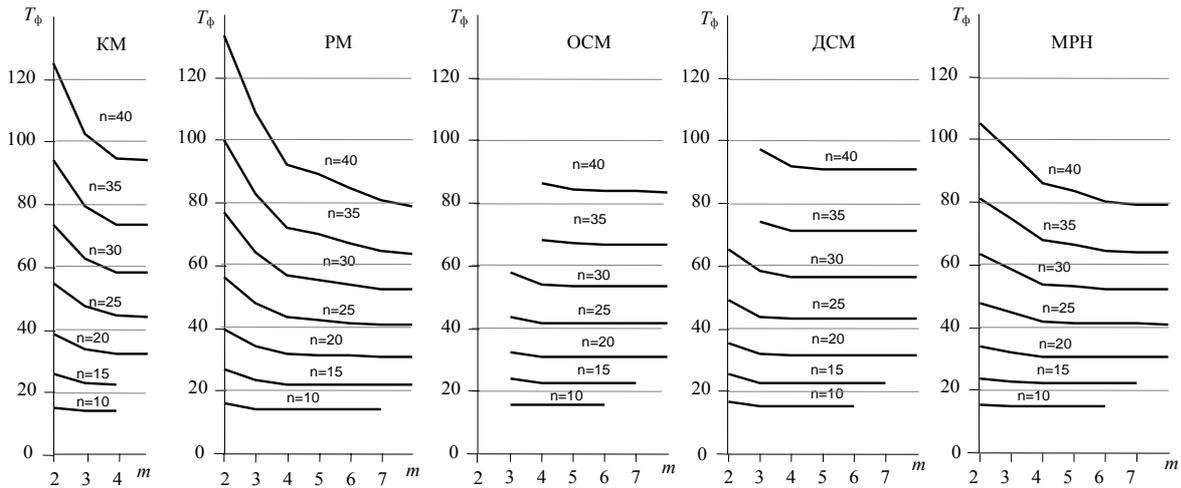
**Оценка эффективности оптимизации схем и выбора оптимального для каждого состава метода**

Тип СУ	$n$	$m$	КМ	РМ	ОСМ	ДСМ	МРН	
Вытяжной путь	15	2	17,4	26,4	-	21,9	12,1	
		3	14,2	22,4	17,4	20,4	14,5	
		4	13,9	18,1	16,2	21,4	14,6	
	25	2	22,3	28,1	-	-	9,2	
		3	17,4	24,0	15,7	21,7	15,8	
		4	19,1	22,8	15,2	23,2	15,7	
	35	2	23,3	28,4	-	-	7,1	
		3	20,4	23,7	-	23,3	14,0	
		4	20,8	23,8	13,7	23,3	16,3	
	Горка	15	2	9,6	23,0	-	11,0	12,0
			3	8,4	14,5	20,7	22,0	19,8
			4	8,4	22,8	20,7	22,0	20,2
25		2	8,7	20,5	-	-	15,1	
		3	9,7	25,2	17,3	19,8	21,1	
		4	10,4	27,0	21,2	26,1	26,1	
35		2	8,0	17,7	-	-	19,5	
		3	9,0	21,4	-	20,9	27,6	
		4	8,5	26,2	21,6	28,1	30,3	

Таким образом, предложенная методика совершенствования процесса формирования многогруппных составов обеспечивает достаточно ощутимый эффект, не требуя при этом значительных капиталовложений на ее реализацию.

Вычислительные эксперименты с разработанной имитационной моделью позволили также установить зависимости продолжительности формирования  $T_{\phi}$  от параметров состава для всех рассматриваемых методов при использовании различных типов сортировочных устройств (вытяжной путь, горка). По результатам исследований получены семейства зависимостей продолжительности формирования от числа используемых путей и числа вагонов в составе  $T_{\phi} = f(m, n)$  для разных методов. Указанные зависимости приведены на рис. 2, а (формирование составов на вытяжном пути) и на рис 2, б (формирование на горке).

а) Вытяжной путь, 8 сортировочных путей



б) Горка, 8 сортировочных путей

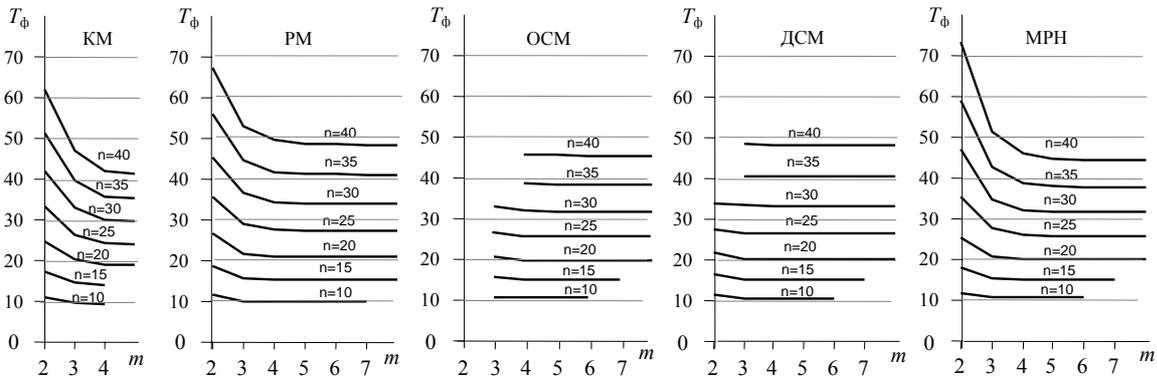


Рис. 2. Семейство зависимостей  $T_{\phi} = f(m, n)$ : а) – вытяжной путь, б) – горка