

## ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ДЕРЕВЯННЫХ ПАЛЛЕТ ПО ПРИВОДНОМУ РОЛИКОВОМУ КОНВЕЙЕРУ

*Хлопков В.П., Алексеев В.И.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

**Ключевые слова:** паллета, поддон, приводной роликовый конвейер, расчет привода, расчет сопротивлений, трение качения.

**Аннотация.** В работе представлены: обзор и сравнительный анализ методик расчет сопротивлений перемещению деревянных паллет на приводном роликовом конвейере, результаты расчета составляющих сопротивлений при движении паллет, рассмотрены особенности методик расчета. Особое значение уделялось динамическим составляющим сопротивлений, присутствующим в современных конвейерных системах и их учет в представленной литературе.

## REVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE RESISTANCE TO MOVEMENT OF WOODEN PALLETS ON A DRIVE ROLLER CONVEYOR

*Khlopkov V.P., Alekseev V.I.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

**Keywords:** pallet, drive roller conveyor, drive calculation, resistance calculation, rolling friction.

**Abstract.** The article presents: a review and comparative analysis of methods for calculating the resistance to movement of wooden pallets on a drive roller conveyor, the results of calculating the components of resistance when moving pallets, the features of calculation methods are considered. Particular attention was paid to the dynamic components of resistance present in modern conveyor systems and their accounting in the presented literature.

### **Введение**

Широкое использование стандартных поддонов в качестве тары для транспортировки грузов началось во второй половине XX века. Для перемещения паллет (поддонов с грузом) использовались различные погрузочно-разгрузочные средства, такие как вилочные погрузчики, краны-штабелеры, конвейеры [1]. С развитием складских технологий необходимость использования приводных роликовых конвейеров для паллет как средства механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных процессов обработки грузов существенно возросла. Существующие методики расчета сопротивлений, возникающих при транспортировании грузов по роликовым конвейерам, предполагают перемещение грузов непрерывным потоком без остановок с отдельным определением статических и динамических составляющих, с использованием большого количества эмпирических коэффициентов и не учитывают особенностей работы роликовых приводных конвейеров для паллет [2]. К особенностям работы этого типа конвейеров относятся: старт-стопный режим работы конвейеров, вызванный необходимостью погрузки паллет на конвейер и

снятия паллет с конвейера, накопления паллет на конвейере, совместной работы конвейера с поворотным столом и подъемником, необходимостью изменения скорости движения паллет по конвейеру в процессе работы и т.п. Все эти особенности требуют разработки методики расчета приводных роликовых конвейеров для паллет.

Цель работы – обзор и сравнительный анализ существующих методик расчета сопротивлений перемещению паллет на приводном роликовом конвейере.

### Обзор методик расчета

Одной из наиболее широко используемых методик расчета сопротивлений перемещению груза на приводном роликовом конвейере является методика, представленная в работах [3-5], в которых рассматривается классический вариант расчета приводного роликового конвейера.

Сопротивление  $W_{уст}$  передвиганию груза при установившемся движении по роликовому конвейеру определяется:

$$W_{уст} = g(z_{zp}M + zm_p) \frac{fd + 2\mu_{кач}}{D} \pm z_{zp}M \sin \beta, \quad (1)$$

где  $z_{гр}$  – число грузов, находящихся на конвейере;  $M$  – масса груза, кг;  $z$  – число роликов конвейера;  $m_p$  – масса ролика, кг;  $f$  – коэффициент трения подшипника;  $d$  – диаметр цапфы подшипника, мм;  $\mu_{кач}$  – коэффициент трения качения между грузом и роликом, мм,  $D$  – диаметр ролика, мм;  $\beta$  – угол наклона роликового полотна, (для паллетных конвейеров он может быть принят равным 0).

Анализируя выражение (1), стоит отметить, что в первом слагаемом при учете сопротивлений от трения качения к массе  $M$  груза прибавляется масса  $m_p$  роликов, которые не учувствуют в качении.

Динамическая составляющая  $W_{дин}$  рассчитывается с учетом инерции груза и моментов инерции вращающихся частей ролика.

$$W_{дин} = \frac{Mgv}{t_p} + 2 \frac{J_{рол} zn_p}{9,55t_p D}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость установившегося движения груза на конвейере, м/с;  $t_p$  – время разгона груза на конвейере, с;  $J_{рол}$  – момент инерции вращающейся части ролика, кг\*м<sup>2</sup>;  $n_p$  – частота вращения ролика, об/мин.

Таким образом, суммарное сопротивление перемещению груза на приводном роликовом конвейере определяется из выражения:

$$W_{общ} = W_{уст} + W_{дин} = g(z_{zp}M + zm_p) \frac{fd + 2\mu_{кач}}{D} \pm z_{zp}M \sin \beta + \frac{Mgv}{t_p} + 2 \frac{J_{рол} zn_p}{9,55t_p D}, \quad (3)$$

В работах [6-8] сопротивление при установившемся движении складывается из двух составляющих:  $W_1$  – сопротивление от трения качения груза по роликам,  $W_2$  – сопротивление от трения в цапфах роликов:

$$W_{уст} = W_1 + W_2 = Mg \frac{2\mu_{кач}}{D} \pm (M + zm_p) g \frac{fd}{D}, \quad (4)$$

Формула (4) аналогична формуле (1) без учета уклона конвейера, сопротивления от качения вращающихся масс роликов. Динамическая составляющая в данной методике определяется по формуле (2).

В работах [9-11] общее  $W_{\text{общ}}$  сопротивление перемещению груза на роликовом конвейере, складывается из: сил трения в опорах  $W_1$ , трения качения  $W_2$  и скольжения  $W_3$  груза по роликам, инерции роликов  $W_4$  и груза  $W_5$ ; трения груза о борта  $W_6$ ; местного сопротивления  $W_7$  при наезде груза на ролики, установленные с отклонением от плоскостности. Таким образом:

$$W_{\text{уст}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7, \quad (5)$$

Сопротивление  $W_1$  и  $W_2$  определяются аналогично формуле (2).  $W_3$  учитывается в случаях наезда груза на невращающийся ролик, что характерно для неприводных и гравитационных роликовых конвейеров.  $W_5$  находится аналогичным способом, как в [3]. Сопротивление  $W_6$  зависит от характера трения груза о борт, что не характерно для паллетных конвейеров. Местное сопротивление при отклонении от плоскостности  $W_7$  рассчитывается по формуле:

$$W_7 \approx Mg \sqrt{\frac{\Delta h}{D}}, \quad (6)$$

где  $\Delta h$  – отклонения от плоскостности роликового полотна, мм.

В [12] данное сопротивление определено точнее и рассчитывается по формуле:

$$W_7 \approx \frac{2Mg}{n} \sqrt{\frac{\Delta h}{D}} \cos \beta, \quad (7)$$

где  $n$  – количество роликов под паллетой.

Таким образом, при расчете приводного роликового конвейера для паллет можно пренебречь значениями сопротивлений  $W_3$ ,  $W_6$ .

Как было отмечено ранее при эксплуатации современных конвейерных приводных роликовых систем для паллет, в которых присутствует большая интенсивность пусков и остановок конвейеров, значение инерции паллет имеет важное значение. Поэтому сопротивления  $W_4$  и  $W_5$  необходимо учитывать в расчетах приводного роликового конвейера для паллет.

Значение  $W_7$  имеет приблизительный характер, однако даже при небольшом перепаде уровней роликов  $\Delta h = 0,01D$  максимальное значение силы местного сопротивления может составить  $W_7 \approx 0,1G$ , что превышает среднее значения суммы сопротивлений  $W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ . Таким образом, для расчета общего  $W_{\text{общ}}$  сопротивления при транспортировании паллет на роликовом приводном конвейере по методике [10] потребуются следующие слагаемые:

$$W_{\text{общ}} = W_1 + W_2 + W_4 + W_5 + W_7, \quad (8)$$

В работах [13-15] предложен пример расчета привода роликового конвейера при перемещении стальных плит, что в первом приближении может быть рассмотрено как аналогия перемещения паллет. Сопротивление перемещению  $W_{\text{уст}}$  при установившемся движении связано только с качением груза по роликам и определяется из выражения:

$$W_{уст} = Mg \frac{fd + 2\mu_{кач}}{D}, \quad (9)$$

Формула (8) соотносится с формулами (1) и (4) однако она не учитывает сопротивление в подшипниках роликов, не задействованных в перемещении паллеты, но вращающихся в процессе работы конвейера. Таким образом, полученное по формуле (8) значение сопротивления будет заниженным. При установившемся движении к сопротивлению  $W_{уст}$  прибавляется динамическая составляющая  $W_{дин}$ , учитывающая инерцию груза и вращающихся масс роликов, которая может быть рассчитана по формуле (2).

В этом случае общее  $W_{общ}$  сопротивление определяется из выражения:

$$W_{уст} = Mg \frac{fd + 2\mu_{кач}}{D} + \frac{Mgv}{t_p} + 2 \frac{J_{пол} z n_p}{9,55 t_p D}, \quad (10)$$

Согласно работе [16] сопротивление перемещению груза по роликовому приводному конвейеру определяется из выражения:

$$W_{общ} = kMg, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от типа перемещаемого груза:  $k = 0,01$  – общий случай;  $k = 0,15$  – при страгивании тарно-штучных грузов;  $k = 0,07$  – при страгивании длинномерных грузов. Под длинномерными грузами в [16] принимают штучные грузы, имеющие соотношение длины и ширины более 2,0, под тарно-штучными грузами – все остальные.

Таким образом в работе [16] при расчете сопротивлений, возникающих при транспортировании паллеты, учитывается только масса  $Mg$  груза и поправочный коэффициент  $k$ , для трех обобщенных потенциальных случаев, что удобно для ориентировочных (оценочных) расчетов, но не позволяет проводить точный расчет сопротивлений, возникающих при перемещении паллет по приводным роликовым конвейерам.

### Сравнительный анализ методик расчета

Для сравнения методик, в качестве примера, проведены расчеты горизонтального приводного роликового конвейера для транспортирования деревянных паллет для трех групп значений параметров (табл. 1).

Величина коэффициента трения качения между деревянным поддоном и металлическими роликами была взята из [17]. Для методик [9] проведено два расчета: с учетом и без учета сопротивления  $W_7$ , где значение  $\Delta h$  принято из [18]. Для методики [16] расчеты проведены для двух значений коэффициента  $k$  – общий случай и при страгивании тарно-штучных грузов. Массы грузов, скорости, время ускорений взяты из расчета действительных роликовых конвейеров для паллет [19].

Результаты сравнительного расчета сопротивлений по описанным методикам приведены в таблицах 2, 3 и 4.

По результатам сравнительного расчета можно увидеть значительную разницу в полученных значениях сопротивлений. Максимальная разница между показателями сопротивления  $W_{общ}$  достигает 34%. Во всех представленных методиках динамическая  $W_{дин}$  составляющая сопротивления остается постоянной

и значительно преобладает над статической  $W_{уст}$  (больше в среднем в 4 раза), что подтверждается в работах [18].

Табл. 1. Параметры груза и конвейера

Параметр	Обознач.	Ед. измерения	Группа значений 1	Группа значений 2	Группа значений 3
Масса паллеты (поддон с грузом)	$M$	кг	500	1000	1500
Габаритные размеры паллеты: длина x ширина	-	мм	1200x800	1200x800	1200x800
Материал паллеты	дерево				
Масса вращающейся части ролика	$m_p$	кг	10	10	10
Момент инерции вращающейся массы ролика	$J_{рол}$	кг*м <sup>2</sup>	0,02	0,02	0,02
Скорость перемещения паллеты	$v$	м/с	0,2	0,3	0,4
Частота вращения ролика	$n_{рол}$	об/мин	42,9	64,35	85,8
Время пуска (разгона) привода перемещения груза	$t_p$	с	0,5	1,0	1,5
Число роликов конвейера	$z$	шт.	25	25	25
Число роликов, находящихся под паллетой	$n$	шт.	8	8	8
Число грузов, находящихся на конвейере	$z_{гр}$	шт.	1	1	1
Коэффициент трения подшипника качения	$f$	-	0,0015	0,0015	0,0015
Коэффициент трения качения между поддоном и роликом	$\mu$	мм	1,2	1,2	1,2
Диаметр цапфы подшипника	$d$	мм	40	40	40
Диаметр ролика	$D$	мм	89	89	89
Отклонение от плоскостности	$\Delta h$	мм	0,85	0,85	0,85

Табл. 2. Результаты сравнительного анализа расчета сопротивлений при перемещении паллеты по приводному роликовому конвейеру для группы значений 1

Источник	Значение общего сопротивления $W_{общ}$ , Н	Значение сопротивления при установившемся движении $W_{уст}$ , Н	Значение динамической составляющей при движении $W_{дин}$ , Н	$W_{дин}/W_{уст}$ , %
Работы [3-5]	2548	496	2052	414
Работы [6-8]	2400	347	2052	591
Работы [9-11]	2559	507	2052	405
Работы [9-11] (без учета $W_7$ )	2400	347	2052	591
Работы [13-15]	2383	331	2052	621
Работа [16] при $k=0,01$	49	-	-	-
Работа [16] при $k=0,15$	736	-	-	-

Табл. 3. Результаты сравнительного анализа расчета сопротивлений при перемещении паллеты по приводному роликовому конвейеру для группы значений 2

Источник	Значение общего сопротивления $W_{\text{общ}}, \text{Н}$	Значение сопротивления при установившемся движении $W_{\text{уст}}, \text{Н}$	Значение динамической составляющей при движении $W_{\text{дин}}, \text{Н}$	$W_{\text{дин}}/W_{\text{уст}}, \%$
Работы [3-5]	3837	827	3011	364
Работы [6-8]	3689	678	3011	444
Работы [9-11]	4008	997	3011	302
Работы [9-11] (без учета $W_7$ )	3689	678	3011	444
Работы [13-15]	3672	661	3011	455
Работа [16] при $k=0,01$	98	-	-	-
Работа [16] при $k=0,15$	1472	-	-	-

Табл. 4. Результаты сравнительного анализа расчета сопротивлений при перемещении паллеты по приводному роликовому конвейеру для группы значений 3

Источник	Значение общего сопротивления $W_{\text{общ}}, \text{Н}$	Значение сопротивления при установившемся движении $W_{\text{уст}}, \text{Н}$	Значение динамической составляющей при движении $W_{\text{дин}}, \text{Н}$	$W_{\text{дин}}/W_{\text{уст}}, \%$
Работы [3-5]	5142	1157	3984	344
Работы [6-8]	4993	1009	3984	395
Работы [9-11]	5472	1488	3984	268
Работы [9-11] (без учета $W_7$ )	4993	1009	3984	395
Работы [13-15]	4976	992	3984	402
Работа [16] при $k=0,01$	147	-	-	-
Работа [16] при $k=0,15$	2207	-	-	-

## Выводы

1. Обзор методик расчета сопротивлений перемещению груза по приводному роликовому конвейеру, показал, что:

- в рассмотренных методиках не рассматривается расчет сопротивлений перемещению деревянных паллет по роликовому полотну. Груз принимается штучным, а из его характеристик берется лишь масса, коэффициенты трения скольжения и качения;

- в методиках различия набор учитываемых параметров, что приводит к различию значений общего сопротивления перемещению груза на конвейере;

- динамические составляющие сопротивлений учитывают только время разгона масс груза и роликов и не учитывают особенностей работы роликовых приводных конвейеров для паллет в старт/стопном режиме работы, изменения скорости движения паллет на разных участках конвейера, общее количество

приводных роликов и количество роликов, находящихся под паллетой, схему запасовки приводной цепи, реверсивный режим работы и т.п.

2. Сравнительный расчет приводного роликового конвейера для транспортирования деревянных паллет показал, что:

– полученные значения общего сопротивления  $W_{\text{общ}}$  отличаются в среднем на 34%;

– значения  $W_{\text{дин}}$  в среднем в 4 раза превышают значения  $W_{\text{уст}}$ , что свидетельствует о необходимости повышения точности расчета динамических нагрузок при расчете общего сопротивления.

3. Проведенный обзор и сравнительный анализ методик расчета сопротивлений перемещению груза по приводному роликовому конвейеру применительно к деревянным паллетам показал, что необходимо проведение экспериментальных исследований по определению сопротивлений перемещению деревянных паллеты по приводному роликовому конвейеру.

### Список литературы

1. Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Система паллетных модулей для складской интралогистики // Вестник машиностроения. – 2016. – № 8. – С. 10-12.
2. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Преимущества использования типовых паллетных интралогистических решений при проектировании и эксплуатации складов // Логистика. – 2016. – № 5(114). – С. 16-21.
3. Иванченко Ф.К. и др. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. – Киев, издательское объединение «Вища школа», Головное изд-во, 1978. – 576 с.
4. Захарычев С.П., Отмахов Д.В. Расчет привода роликового конвейера и выбор материалов пар трения // Ученые заметки ТОГУ. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 7-17.
5. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учеб. Пособие для машиностроительных вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
7. Мерданов Ш.М., Смолин Н.И., Иванов А.А., Шефер В.В. Машины непрерывного транспорта: Учебное пособие. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2010. – 208 с.
8. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта: учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 432 с.
9. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. и др. Машины непрерывного транспорта: Учебник, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
10. Матвеев В.И., Смоляр А.П. Машины непрерывного транспорта: учебно-методическое пособие. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 368 с.
11. Портакоев А.Б., Исупова И.В. Механика. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие. Т. 2. – зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственной аграрный университет", 2015. – 145 с.
12. Серов И.Н. Оценка местных сопротивлений при движении паллет по гравитационным роликовым конвейерам // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник статей 26-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 398-402.
13. Методическое пособие по подбору оборудования и расчета привода компании Sew-Eurodrive [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.sew-eurodrive.ru/>.

14. Ерохин М.Н. и др. Подъемно-транспортные машины: учебник. – М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 456 с.
15. Беляков В.Н. Разработка методик расчета параметров движения штучного груза, создания и расчета передающих устройств на вертикальных перегибах роликовых конвейеров: Дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 1985. – 238 с.
16. ГОСТ 29320-92 Механическое оборудование груз распределительных систем. Основы расчета. Официальное издание. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
17. Хлопков В.П. Сравнительный анализ результатов исследований коэффициента трения качения сухих и влажных образцов деревянных поддонов по металлическим роликам // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. – С. 205-211.
18. ГОСТ 8732-78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2) Трубы металлические и соединительные части к ним. Часть 1. Трубы бесшовные гладкие: Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
19. Ставрова Н.Д. Технология и механизация погрузочно-разгрузочных работ: учебно-методический комплекс. – Павлодар: Кереку, 2010. – 105 с.

Сведения об авторах:

*Хлопков Владимир Петрович* – аспирант;

*Алексеев Вадим Игоревич* – магистрант.