

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ПОЛИСПАСТА И НАТЯЖЕНИЙ КАНАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Поликарпов Ю. В., Жуков К. К.

В отечественной периодической печати время от времени поднимается вопрос о корректности общепринятого подхода к определению КПД полиспаста. Причина кроется в недостаточном обосновании исходных положений, а также в том, что КПД полиспаста, состоящего из одного блока, оказывается выше, чем КПД отдельного блока. В работе на основе принципа возможных перемещений подтверждена корректность общепринятого подхода и дано объяснение отмеченному соотношению КПД. Предложено в учебной литературе излагать решение этой задачи на основе принципа возможных перемещений.

У вітчизняному періодичному друці час від часу піднімається питання про коректність загальноприйнятого підходу до визначення ККД поліспаста. Причина криється в недостатньому обґрунтуванні початкових положень, а також в тому, що ККД поліспаста, що складається з одного блоку, виявляється вищим, ніж ККД окремого блоку. У роботі на основі принципу можливих переміщень підтверджена коректність загальноприйнятого підходу і дано пояснення відміченому співвідношенню ККД. Запропоновано у навчальній літературі викладати рішення цієї задачі на основі принципу можливих переміщень.

In the domestic periodic seal from time to time is levitating a question about correctness of the generally accepted approach to determination efficiency polyspast. A reason is covered in the insufficient argumentation of initial positions, and also in that efficiency polyspast consisting of one block, appears higher, than efficiency separate block. In-process, on the basis of principle of the possible moving correctness of the generally accepted approach is confirmed and explanation is given to the noted correlation efficiency. Offered in educational literature to expound the decision of this task on the basis of principle of the possible moving.

Поликарпов Ю. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ПТМ ДГМА  
ptm@dgma.donetsk.ua

Жуков К. К.

студент ДГМА

УДК 621.86.01

Поликарпов Ю. В.<sup>1</sup>, Жуков К. К.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ПОЛИСПАСТА И НАТЯЖЕНИЙ КАНАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Полиспасты являются давно известными и широко используемыми в технике простыми механизмами. Их устройство, принцип работы и зависимости между основными параметрами изучаются в курсах физики и механики, начиная с 7-го класса средней школы и заканчивая специальными курсами по грузоподъемным машинам в высшей школе. При этом даже в высшей школе для описания полиспаста используется простой математический аппарат, доступный ученикам средней школы. Несмотря на столь очевидную простоту, не все сегодня в этом механизме ясно. В частности, существуют различные подходы к определению его КПД, дающие заметно различающиеся результаты. И дело даже не в числах: в таких простых механизмах, на основе которых строится фундамент технического образования, не должно быть неоднозначностей.

Схема полиспаста приведена на рис. 1.

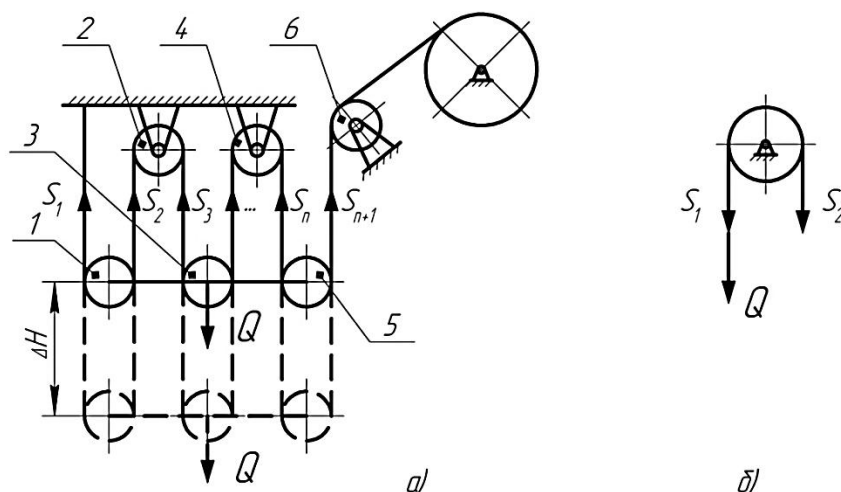


Рис. 1. Схема полиспаста:

а – полиспаст; б – отклоняющий блок; 1–5 – блоки полиспаста; 6 – отклоняющий блок

Задача заключается в том, чтобы определить КПД полиспаста при подъеме и опускании груза, если известны КПД входящих в него блоков.

При общепринятом подходе, излагаемом в различных источниках, в частности, учебниках по грузоподъемным машинам, считают, что сумма натяжений всех ветвей полиспаста равна силе тяжести груза. Натяжение каждой последующей ветви в направлении движения каната возрастает пропорционально коэффициенту потерь на соответствующем блоке. Вычислив натяжения ветвей, начиная с ветви, идущей на барабан, работу привода, и работу, затраченную на подъем груза, КПД определяют как отношение разности этих работ к работе, затраченной на подъем груза. Результирующая формула имеет вид:

$$\eta_{\text{пол}} = \frac{1 - \eta^n}{n \cdot (1 - \eta)}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Поликарпов Ю. В. – постановка задачи, метод решения и выводы.

где  $\eta$  – КПД отдельного блока;  
 $n$  – кратность полиспаста.

При альтернативном подходе [1, 2] считают, что сумма натяжений всех ветвей равна силе тяжести груза только при неподвижном канате. При работе полиспаста происходит перераспределение натяжений (Перераспределение натяжений подразумевается и в первом подходе). При перераспределении неизменным остается только натяжение самой удаленной от привода ветви каната. Оно равно силе тяжести груза, деленной на кратность полиспаста. Далее действуют так же, только начиная с наиболее удаленной ветви каната. Результирующая формула имеет вид:

$$\eta_{\text{пол}} = \eta^{n-1}. \quad (2)$$

Результаты расчета КПД полиспаста и натяжения ветви каната, идущей на барабан, по формулам (1) и (2) заметно различаются.

Оба подхода к решению поставленной задачи имеют один и тот же недостаток – они основаны на интуитивных представлениях, которые не могут служить доказательной базой. Кроме того, многим кажется противоестественным то, что при общеизвестном подходе полиспаст с кратностью два имеет более высокий КПД, чем отдельно взятый блок. Поэтому, время от времени, делаются попытки пересмотреть устоявшуюся точку зрения [1–4].

Целью данной работы является разработка метода расчета натяжений ветвей каната и КПД полиспаста, основанного на теоретических положениях механики.

Поскольку КПД механизмов, как правило, определяются в установившихся режимах, когда скорости рабочих перемещений постоянны, то правомерно рассмотреть задачу в статической постановке, считая, что система находится в состоянии равновесия.

Как известно из теоретической механики, условия равновесия системы в общем виде определяются на основе принципа возможных перемещений. Применительно к системе с идеальными связями этот принцип формулируется так: «Для равновесия механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы элементарная работа активных сил на возможных перемещениях была равна нулю». Идеальные связи – связи, работа реакций которых на возможном перемещении равна нулю, или пренебрежимо мала.

Из сути решаемой задачи ясно, что в данном случае пренебречь работой реакций связей нельзя, иначе КПД будет равен единице.

В случае неидеальных связей необходимо, чтобы на возможных перемещениях была равна нулю сумма элементарных работ активных сил и реакций связей.

Для этого случая уравнение равновесия имеет вид:

$$\delta A^a + \delta A^r = 0, \quad (3)$$

где  $\delta A^a$ ,  $\delta A^r$  – работа активных сил и реакций связей на возможном элементарном перемещении, соответственно.

Система, рассматриваемая в данной задаче, имеет одну степень свободы, отличается неизменностью структуры и стационарностью связей. Это позволяет перейти от элементарных перемещений к конечным перемещениям и рассматривать одну цепочку взаимосвязанных перемещений.

К активным силам отнесем натяжение ветви каната, идущей на барабан и силу тяжести груза. Их возможные перемещения связаны соотношением:

$$\Delta l_k = (n + 1) \cdot \Delta H_{\text{гр}}, \quad (4)$$

где  $\Delta l_k$  – перемещение идущей на барабан ветви каната,  $\Delta H_{\text{гр}}$  – перемещение подвески с грузом,  $n$  – число блоков полиспаста без учета отклоняющихся блоков,  $(n + 1)$  – кратность полиспаста.

Обозначим натяжения ветвей каната через  $S_i$ , где  $i$  – номер ветви, начиная с ветви, наиболее удаленной от лебедки.

Найдем реакции связей (силы сопротивления движению) на каждом блоке как разность натяжений набегающей и сбегающей ветвей каната:

$$R_{k \leq n} = -(S_{i=k+1} - S_{i=k}), \quad (5)$$

где  $k$  – номер блока.

Исходя из принципа работы полиспаста (рис. 1), перемещение каната на первом блоке будет равно  $\Delta H$ , на втором –  $2\Delta H$ , и на  $k$ -м блоке –  $k\Delta H$ . Умножив реакции связей на соответствующие перемещения, найдем работу этих реакций на каждом блоке:

$$A_{k \leq n}^r = -(S_{i=k+1} - S_{i=k}) \cdot k \cdot \Delta H.$$

Просуммируем работу реакций связей:

$$\sum_{k=1}^n A_k^r = -\Delta H \cdot [(S_2 - S_1) \cdot 1 + (S_3 - S_2) \cdot 2 + (S_4 - S_3) \cdot 3 + \dots + (S_{i=k+1} - S_{i=k}) \cdot k],$$

после приведения подобных членов получим:

$$\sum_{k=1}^n A_k^r = -\Delta H \cdot (-S_1 - S_2 - S_3 - \dots - S_n + n \cdot S_{n+1}). \quad (6)$$

Работа привода будет равна произведению натяжения последней ветви каната (идущей на барабан) на перемещение этой ветви, равное  $(n+1) \cdot \Delta H$ :

$$A_{\text{пр}} = S_{n+1} \cdot (n+1) \cdot \Delta H. \quad (7)$$

Подставив (6) и (7) в (3) будем иметь:

$$S_{n+1} \cdot (n+1) \cdot \Delta H - \Delta H \cdot (-S_1 - S_2 - S_3 - \dots - S_n + n \cdot S_{n+1}) - Q \cdot \Delta H = 0, \quad (8)$$

откуда

$$S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = Q. \quad (9)$$

Таким образом, правомерность принятого при выводе формулы (1) равенства суммы натяжений ветвей полиспаста силе тяжести груза доказана. Следовательно, доказана справедливость формулы (1).

Цена вопроса велика. Это видно из сравнения результатов расчетов по формулам (1) и (2), приведенных в табл. 1.

Если бы формулы [2] были справедливы, то, как видно из табл. 1, для нормальной работы полиспаста кратностью 8, разрывное усилие используемого каната и мощность приводного двигателя следовало бы увеличить на 20 %. Продолжив вычисления, можем определить, что при кратности 12 рост составит 35 %, а при кратности 20–70 %. Поскольку полиспасты ныне действующих кранов проектировались на основе общепринятого подхода, то такое несоответствие привело бы к многочисленным авариям реально работающих кранов, что не наблюдается.

Физический смысл того, что КПД полиспаста с кратностью два, состоящего из одного подвижного блока, выше, чем КПД неподвижного блока, становится ясен из рассмотрения схем нагружения полиспаста и одиночного неподвижного блока на рис. 1, а–б. Предположим, что полиспаст на схеме 1а состоит из одного подвижного блока. Для него, как и для любого полиспаста, справедливо выражение (9), т. е.:

$$S_1 + S_2 = Q.$$

Таблица 1

## Определение КПД полиспаста общепринятым методом и по [2]

КПД блока = 0,95		Натяжения ветвей каната								Работа привода	Сумма натяжений	КПД	
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й				
Кратность полиспаста	2	Общепринятый	0,487	0,513							1,025641	1,0000000	0,9750
		По [2]	0,5	0,526							1,052632	1,02631579	0,9500
	4	Общепринятый	0,231	0,243	0,256	0,27					1,078203	1,0000000	0,9275
		По [2]	0,25	0,263	0,277	0,292					1,166351	1,0817539	0,8574
	6	Общепринятый	0,146	0,154	0,162	0,17	0,179	0,189			1,132468	1,0000000	0,8830
		По [2]	0,167	0,175	0,185	0,194	0,205	0,215			1,292355	1,14118478	0,7738
	8	Общепринятый	0,104	0,109	0,115	0,121	0,127	0,134	0,141	0,149	1,188426	1,0000000	0,8414
		По [2]	0,125	0,132	0,139	0,146	0,153	0,162	0,17	0,179	1,431973	1,2049320	0,6983

При определении КПД неподвижного блока (рис. 1, б), для суммы натяжений можно записать приближенное равенство:

$$S_1^H + S_2^H \cong 2Q.$$

Поскольку в каждом из этих случаев перемещения груза и каната относительно блоков одинаковы, а сила сопротивления пропорциональна сумме натяжений, то работа сил сопротивления на подвижном блоке будет в два раза меньше, чем на неподвижном, а значит, соответственно больше КПД.

Если оба конца каната, огибающего подвижный блок, будут идти на барабаны (или барабан), то КПД такого, с позволения сказать, полиспаста будет вообще равен единице. Если канаты идут на разные барабаны, то изменяя скорость наматывания одного из концов каната от нуля до номинала, будем получать разные значения КПД от КПД полиспаста с кратностью два до единицы.

При опускании груза рассуждения аналогичны. Изменяется направление движения каната и направления действия реакций связей, движущей становится сила тяжести груза.

### ВЫВОДЫ

Принятое в общепринятом подходе к определению КПД полиспаста предположение о равенстве суммы натяжений ветвей полиспаста силе тяжести груза соответствует действительности, в связи с чем полученные при его использовании результаты – правильны.

Решение данной задачи в курсах грузоподъемных машин, читаемых в высшей школе, следует излагать, основываясь на принципе возможных перемещений.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов М. А. КПД полиспаста и эксплуатационная надежность грузоподъемных машин / М. А. Козлов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2006. – № 6. – С. 30–31.
2. Глушко М. Ф. О статике полиспастных подвесок / М. Ф. Глушко, М. А. Козлов, И. А. Шилин // Детали машин и подъемно-транспортные машины : Республ. научно-техн. сб. – Киев, 1969. – № 10. – С. 132–137.
3. Арбесман М. Ш. К вопросу о КПД полиспастов / М. Ш. Арбесман // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1971. – № 4. – С. 38–71.
4. Белоцерковский П. М. К вопросу определения КПД полиспастов / П. М. Белоцерковский // Вестник машиностроения. – 1969. – № 3. – С. 46–47.

Статья поступила в редакцию 24.12.2012 г.