

УДК 621.85.01

© Е.А. Коровяка, Т.Н. Лубенец

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Приведено обоснование метода расчета тяговой способности ленточного конвейера на основе нового решения классической задачи Эйлера о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку.

Приведено обґрунтування методу розрахунку тягової спроможності стрічкового конвейера на основі нового розв'язання класичної задачі Ейлера про ковзання гнучкого тіла по нерухомому блоці.

The substantiation of the method of calculation of the traction capacity of belt conveyor based on the new solution of the problem of the classical Euler flexible body sliding on the fixed block.

В настоящее время для транспортирования основных грузов на горных предприятиях широкое применение нашли ленточные конвейеры. Эффективная эксплуатация ленточных конвейеров в условиях энергетического кризиса, невозможна без обоснования режимов эксплуатации, а именно усилия предварительного натяжения конвейерной ленты, влияющего на их тяговую способность. Рациональные режимы эксплуатации конвейеров способствуют экономии электроэнергии, повышению ресурса работы конвейерной ленты и тяговых двигателей, уменьшению себестоимости, повышению производительности и безопасности транспортирования.

Определение тяговой способности ленточных конвейеров при проектировании и эксплуатации в настоящее время осуществляется в соответствии с действующим законом трения гибких тел (уравнением трения гибких тел), основанном на выводах Леонарда Эйлера (уравнение Эйлера) [1,2].

Рассмотрим расчетную схему рис. 1.:

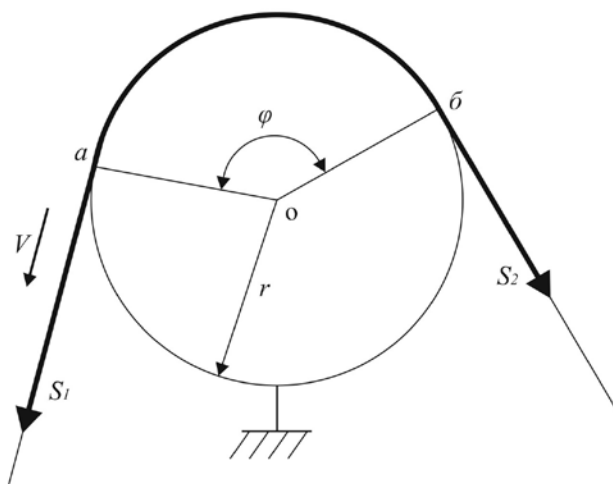


Рис. 1. Расчетная схема: S_1 , S_2 – большая и меньшая силы натяжения гибкого тела, приложенные к концам гибкого тела; r – радиус блока; φ – угол обхвата блока гибким телом.

В соответствии с выводом Эйлера идеальная нить, охватывающая неподвижный блок, под действием приложенных к ее концам сил S_1 и S_2 скользит по неподвижному блоку в направлении большей силы, превышающей другую силу на величину суммарной силы трения, которая возникает между нитью и неподвижным блоком, а отношение большей силы к меньшей описывается уравнением:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{f \cdot \varphi}$$

где f – коэффициент трения скольжения между гибким телом и блоком.

Уравнение Эйлера до настоящего времени используется во всем мире в научных исследованиях, образовании и машиностроении, а сам вывод уравнения исследователями, преподавателями и студентами рассматривается, как показательный классический пример решения задач механики аналитическими методами, основателем которых является Эйлер [3].

Определение тяговой способности конвейеров проводят со значительным запасом [1,2]. Коэффициент запаса тяговой способности k_T , равняется отношению расчетного тягового усилия $F_{н-с}$ к его действительному значению F_0 :

$$\frac{F_{н-с}}{F_0} = k_T$$

где $F_{н-с}$ – расчетное тяговое усилие при скольжении; F_0 – действительное тяговое усилие при сцеплении; k_T – коэффициент запаса тяговой способности.

Для ленточных конвейеров расчетный запас тяговой способности составляет 40% ($k_T = 1,4$), а для шахтных подъемных машин запас от проскальзывания гибкого тела и шкива или барабана трения еще больше – 230% ($k_T = 2,3$) [1,2]. Вместе с тем, известно, что предельная сила трения сцепления между твердыми телами больше силы трения скольжения, т.к. коэффициент трения покоя всегда больше коэффициент трения скольжения, рис. 2:



Рис. 2. Значение силы трения в зависимости от относительного смещения трущихся тел при сдвиге (сцеплении), переходящем в скольжение.

Поэтому действительный расчетный запас тяговой способности ленточного конвейера будет еще больше 40%.

Тяговое усилие ленточных конвейеров реализуется трением конвейерной ленты о барабан приводной станции за счет ее прижатия под действием усилий натяжения [1,4]. При скольжении гибкого тела по блоку тяговое усилие определяется в соответствии с уравнением Эйлера следующим образом:

$$F_{н-с} = S_1 - S_2 = S_2 \cdot e^{f \cdot \varphi} - S_2 = S_2 \cdot (e^{f \cdot \varphi} - 1).$$

Поэтому, расчет тяговой способности конвейеров осуществляется по минимальному натяжению в сбегавшей с барабана ветви конвейерной ленты S_{2min} , выбранному с запасом в соответствии с действующим законом трения гибких тел [1,2]:

$$S_{2min} = \frac{F_0 k_T}{(e^{f \cdot \varphi} - 1)}$$

где S_{2min} – минимальные усилия натяжения конвейерной ленты в точке сбегания.

При этом не учитывается натяжение конвейерной ленты в точке набега на барабан, от которой в совокупности с натяжением ленты в точке сбегания с барабана, как известно, зависит нормальная реакция между парой трения, что сказывается на тяговом усилии ленточного конвейера.

Не учитываются также центробежные силы конвейерной ленты, которые уменьшают тяговое усилие конвейеров. Например, для максимальной скорости движения ленты карьерных конвейеров, достигающей 8 м/с, линейной массы резинотросовой ленты типа РТР-4000 шириной 1,6 м, равной 89,6 кг/м, и угла обхвата лентой барабанов приводной станции - 420° центробежная сила составляет:

$$C = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{q \cdot r \cdot \varphi \cdot v^2}{r} = 89,6 \cdot 7,33 \cdot 8^2 = 42033 \text{ Н}$$

где C – центробежная сила; m - масса ленты, контактирующая с барабанами приводной станции; v - скорость движения ленты; r – радиус барабанов; q - линейная масса ленты.

Следовательно, уменьшение нормальной реакции между лентой конвейера и барабанами приводной станции в этом случае равно центробежной силе и составляет 42033 Н, что значительно уменьшает реализуемое тяговое усилие приводной станции конвейера. Для указанной выше ленты предельной ширины карьерных конвейеров, достигающей 3 м, ее центробежная сила составляет 78812 Н.

Вместе с тем, известно, что уравнение Эйлера значительно отличается от данных практики [4]. Некоторые исследователи, например, считают, что имеет место следующее некогерентное соотношение между параметрами трения гибкого тела:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{k \cdot f \cdot \varphi}$$

где k – эмпирический коэффициент (равняется 0,5 в соответствии с исследованиями М. Т. Уразбаева, а по исследованиям А.В. Андреева - 0,7).

В настоящее время принято считать, что мнимый коэффициент трения между барабаном и конвейерной лентой, вычисленный косвенно в соответствии с уравнением Эйлера, до 30 % выше действительного, установленного на плоскости прямым методом [4].

Кроме того, уравнение Эйлера не преобразуется к виду, включающему общепризнанные факторы трения тел: нормальную реакцию между гибким телом и блоком и молекулярную составляющую силы трения между телами, а также не подтверждает их традиционную линейную связь с силой трения.

Следовательно, возникает сомнение относительно правильности тяговых расчетов ленточных конвейеров.

Вопросом решения задачи о скольжении гибкого тела по блоку занимались многие исследователи в течение столетий, в том числе сотрудники НГУ, Национального университета и Института геотехнической механики: К.С. Поляков, В.И. Моссаковский, И.Г. Штокман, Н.Я. Биличенко, В.П. Франчук, В.П. Смирнов, Р.В. Кирия.

Несмотря на указанное и многочисленные работы выдающихся ученых М. Кретца, М. Т. Уразбаева, Гростофа, М.К. Демьянова, Н.П. Петрова, Н.Е. Жуковского, О. Кеммерера, А. Фебера, А. Фридериха, Е.А. Иванова, В.А. Добровольского, Е.М. Гутьяра, Хамеля, М.В. Цепляева, В.С. Полякова, Е.Г. Глухарева, И.Г. Штокмана, П.М. Огибалова, А.Л. Рабиновича, М.Н. Федотова, Б.Л. Давыдова, Чжу-Ши-юй, Г.М. Бартенева, В.И. Чуканова, А.В. Андреева, Л.И. Колчина, В.И. Моссаковского, А.Ю. Ишлинского и многих др. в области уточнения, взятого ими за основу вывода Эйлера в задаче о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку, его решение по-прежнему считалось самым совершенным и убедительным [4]. При этом правильность уравнения Эйлера для идеального гибкого тела (идеальной нити) не подвергалась сомнению.

Однако, вывод Эйлера для идеального гибкого тела на сегодняшний день не является правильным. Поскольку он не отвечает представлениям о трении твердых тел Кулона и современной редакции закона сохранения механической энергии в замкнутой механической системе, открытых после выводов Эйлера и господствующих в настоящее время. Закон трения тел Кулона был открыт в 1779 г., а современная редакция закона сохранения механической энергии сформулирована в 40 годах 19 века. Не учитываются также и влияние центробежных сил гибкого тела.

Поэтому, уточнения, полученные многими исследователями на протяжении столетий, принявших за основу вывод Эйлера, и, собственно, его гениальный вывод не отвечают указанным представлениям о трении тел и сохранении механической энергии гибких тел [5]. В частности, Эйлер просто не знал, что в

природе действует принцип сохранения механической энергии, включающий не только кинетическую энергию гибкого тела, но и потенциальную.

Все это укрепляет наше сомнение относительно правильности действующего уравнения трения гибких тел и достоверности тяговых расчетов транспортных машин с гибким тяговым органом, основанных на решении Эйлера в задаче о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку, ставшей классической, [5].

Вместе с тем, в 2007 г. в рамках консервативной механической системы предложен новый вывод результатов решения классической задачи Эйлера о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку. Указанное решение учитывает изменившиеся после выводов Эйлера представления о трении твердых тел и современную редакцию закона сохранения механической энергии в замкнутой механической системе [5]. Новое уравнения трения гибких тел опосредованно содержит общепризнанные факторы трения тел: нормальную реакцию между гибким телом и блоком и молекулярную составляющую силы трения между телами, а также подтверждает их традиционную линейную связь с силой трения.

В дальнейшем в соответствии с полученным новым уравнением трения гибких тел учтено влияния центробежных сил гибкого тела [6]:

$$F = f \cdot \frac{(S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2) \cdot \varphi}{2} = f \cdot N.$$

Следовательно, для реализации ленточным конвейером заданного тягового усилия необходимо обеспечить достаточную нормальную силу прижатия (реакцию) между конвейерной лентой и приводным барабаном или соответствующее суммарное усилие натяжения конвейерной ленты на приводном барабане. Указанное отвечает общепринятым представлениям о трении тел, является логичным, очевидным и понятным:

$$N = \frac{\varphi \cdot (S_1 + S_2 - 2qv^2)}{2} \geq \frac{F_0}{f};$$
$$(S_1 + S_2) = \frac{2N}{\varphi} + 2qv^2, \quad N \geq \frac{F_0}{f}.$$

Экспериментальное определение фрикционных свойств конвейерной ленты при трении по барабану, осуществлялось на испытательном стенде [7]. Полученные показатели согласуются с накопленными данными практики [4]. Расчетное тяговое усилие для сухой конвейерной ленты по новому решению задачи Эйлера равно действительной силе трения между парой трения (разница усилий S_1 и S_2) и до 32% больше значения, вычисленного в соответствии с уравнением Эйлера. Смачивание пары трения привело к уменьшению относительной разницы сравниваемых расчетных тяговых усилий. При этом впервые использовался не мнимый, определенный косвенно в соответствии с уравнением Эйлера, а действительный коэффициент трения f , рассчитанный прямым методом по новому решению задачи Эйлера, как отношение силы трения к нормальной реакции между парой трения.

Действительный коэффициент трения для сухой ленты составляет около 0,433, что до 22% меньше значения, найденного косвенно в соответствии с уравнением Эйлера. Смачивание конвейерной ленты также приводит к уменьшению относительной разницы сравниваемых расчетных коэффициентов трения.

Соответствующая расчетная нормальная реакция между телами по новому уравнению трения гибких тел до 30% больше значения, вычисленного косвенно в соответствии с уравнением Эйлера. Она не зависит от фрикционных свойств гибкого тела. В соответствии с уравнением Эйлера нормальная реакция между телами, наоборот, весьма существенно зависит от фрикционных свойств гибкого тела.

В общем случае при сцеплении конвейерной ленты и барабана (относительная скорость смещения между лентой и барабаном равна нулю), когда сила и коэффициент трения сцепления меньше предельной силы сцепления и коэффициента трения покоя в качестве силы трения в расчетах должна использоваться неполная сила трения сцепления.

Выводы. Таким образом, обосновано условие для реализации заданного тягового усилия ленточного конвейера. Указанное условие вытекает из нового уравнения трения гибких тел и может быть использовано при проектировании ленточных конвейеров и выборе рационального режима их эксплуатации в части определения и обеспечения необходимой тяговой способности. Тяговая способность ленточных конвейеров определяется коэффициентом трения скольжения гибкого тела, суммарным усилием его натяжения на приводном барабане, углом обхвата, весом гибкого тела и скоростью движения.

Достоверность обоснованного условия подтверждается накопленной практикой и проведенным экспериментом, обуславливается соблюдением в нем господствующего закона трения твердых тел Кулона и фундаментального принципа природы - закона сохранения механической энергии в замкнутой консервативной механической системе, а также известным влиянием центробежной силы тела, которая для ленточных конвейеров и других машин с гибким тяговым органом может достигать значительных величин.

Список литературы

1. Біліченко М.Я. Основи теорії та розрахунки засобів транспортування вантажів шахт: Навч. посібник / Біліченко М.Я. – Дніпропетровськ: Національна гірнича академія України, 2002. – 103 с.
2. РТМ 24.093.04-80. Проектирование стационарных ленточных конвейеров общего назначения. - 1980.
3. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов / Тарг С.М. – [12-е изд.] – М.: Высш. шк., 1998. – 416 с.
4. Андреев А.В. Передача трением / Андреев А.В. – М.: Машгиз, 1978. – 176 с.
5. Лубенец Н.А. Альтернативный формуле Эйлера закон реализации тягового усилия трением / Лубенец Н.А. // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск, 2008. – № 11.- С. 67 – 70.
6. Лубенец Н.А. Влияние центробежных сил гибкого тела на реализацию тягового усилия трением. / Лубенец Н.А., Лубенец Т.Н. // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2012. – № 5. – С. 28 – 33.
7. Биличенко Н.Я. Экспериментальное определение коэффициента трения ленты о барабан / Биличенко Н.Я. // Вопросы рудничного транспорта. – М.: Углетехиздат, 1954. – С.54–60.
- 8.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ширінім Л.Н.
Надійшло до редакції 21.10.2014*