

магнитообогатительной фабрики с шаровым измельчением.// Обогащение руд черных металлов.- М.: Недра, 1979.- Вып.8.- Тр.инст-та Механобрчермет.

6. Дмитриев В.И. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам./ А.С. 1269838 СССР, МКИ В ОЗ в 13/00. Заявлено 27.05.85. Опубликовано 15.11.86. Бюл. №42// Открытия; изобретения.- 1986.- №42.- с.82.

7. Барский Л.А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых./ Барский Л.А., Козин В.З.- М.: Недра, 1978.- 486с.

8. Дмитриев В.И. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам/ А.с. 1666180 СССР, МКИ ВОЗв 13/00. Заявлено 19.12.88. Опубликовано 30.07.91. Бюл. №28// Открытия. Изобретения.- 1991.- №28.- с.82.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ТРЕНИИ ГИБКОГО ТЕЛА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В МАШИНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Н.А. Лубенец, Национальный горный университет, Украина

Восстанавливаются традиционное представление о прямом влиянии на трение гибких тел молекулярной составляющей силы трения, нормальной реакции между телами и его фрикционных свойств, что отвечает общему характеру законов внешнего и внутреннего трения тел. Полученные знания планируется использовать при проектировании и эксплуатации транспортных машин с гибким тяговым органом нового поколения, которые распространяются на определение их тяговой способности и обоснования рациональных режимов работы.

В настоящее время на горных предприятиях для транспортирования основных грузов широкое применение нашли горные машины с гибким тяговым органом – конвейеры, напочвенные и подвесные дороги, подъемные машины шахт и другие.

Рост экономического развития страны предполагает создание совершенных транспортных машин с более высокими функциональными, технологическими, экономическими и антропологическими показателями. Решение этой задачи сопряжено с использованием в них современных знаний в области механики и научно-технических достижений, в том числе реализации большего тягового усилия на приводном блоке машин.

Тяговая способность указанных машин реализуется трением гибкого тягового органа по барабану или шкиву трения приводной станции за счет его прижатия под действием усилий натяжения, в качестве которых используются конвейерные ленты, тросы и клиновые ремни. Эффективная эксплуатация машин в условиях энергетического кризиса, невозможна без определения их тяговой способности и обоснования рациональных режимов эксплуатации.

Вместе с тем, действующие представления о трении гибких тел, которыми пользуются при определении тяговой способности приводного блока машины, уже давно сформировались и принципиально не меняются многие годы. Знания о трении твердых и гибких тел и их развитие в нашей цивилизации описываются законами трения тел, названными именами гениальных исследователей - Леонардо да Винчи, Амонтона, Эйлера и Кулона.

Определение тяговой способности транспортных машин проводят в соответствии с законом трения гибких тел Эйлера, полученном в 1775 году (уравнением Эйлера, формулой Эйлера) [1]. Рассмотрим расчетную схему, рис. 1.

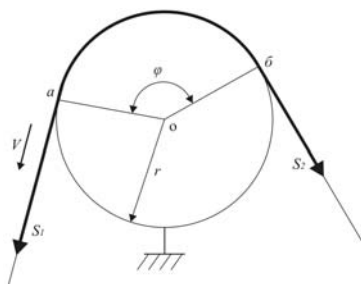


Рис. 1. Расчетная схема: S_2 , S_1 – усилия натяжения в набегающей и сбегающей с барабана ветвях гибкого тела; r – радиус барабана; φ – угол обхвата барабана гибким телом; v – направление и скорость движения.

При скольжении по неподвижному блоку гибкое тело под действием приложенных к ее концам сил скользит по неподвижному блоку в направлении большей силы, превышающей другую силу на величину суммарной силы трения, которая возникает между телами, а отношение большей силы к меньшей равно:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{f \cdot \varphi} \quad (1)$$

где S_1 , S_2 – натяжения в сбегающей и набегающей на блок ветвях гибкого тела; f – коэффициент трения скольжения между гибким телом и блоком; φ – угол обхвата блока гибким телом; φ – угол обхвата блока гибким телом.

Указанный закон широко используется в настоящее время в науке, образовании и машиностроении для расчета тяговой способности при проектировании и эксплуатации машин с гибким тяговым органом.

Тяговую способность указанных машин осуществляют в соответствии с уравнением Эйлера со значительным запасом. Запас тяговой способности машин учитывается коэффициентом запаса, который равняется отношению расчетного тягового усилия машины при скольжении гибкого тела по барабану к его заданному значению при сцеплении [1-3]:

$$\frac{F_{н-с}}{F_0} = k_T \quad (2)$$

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

Расчет тяговой способности этих машин осуществляется по минимальному натяжению гибкого тела в сбегающей с барабана ветви при скольжении тел в соответствии с уравнением Эйлера:

$$S_{2\min} = \frac{F_0 k_T}{(e^{f \cdot \varphi} - 1)} \quad (3)$$

где $S_{2\min}$ – минимальные усилия натяжения гибкого тягового органа в точке сбегаения.

Для ленточных конвейеров и напочвенных дорог расчетный запас тяговой способности достигает 40% ($k_T=1,4$), а для шахтных подъемных машин еще больше – 130% ($k_T=2,3$) [2-3]. Вместе с тем, известно, что сила трения сцепления между телами больше силы трения скольжения, т.к. коэффициент трения покоя всегда больше коэффициент трения скольжения. Отсюда действительный запас тяговой способности машин будет еще больше указанных.

Поэтому рациональные режимы эксплуатации указанных машин способствуют экономии электроэнергии, повышению ресурса работы гибких тяговых органов и тяговых двигателей, уменьшению себестоимости транспортирования, повышению производительности и безопасности их работы.

Известно также, что уравнение Эйлера, лежащее в основе используемых расчетов, отличается от данных практики. Принято считать, что коэффициент трения между гибким телом и блоком, определенный косвенно на цилиндрической поверхности в соответствии с

уравнением Эйлера, до 30% выше действительного коэффициента трения, определенного прямым методом на плоской поверхности в соответствии с законами трения тел Кулона и Амонтона и др. [1,4,5].

Следовательно, возникает сомнение относительно правильности тяговых расчетов транспортных машин.

Несмотря на указанные недостатки и многочисленные работы известных исследователей в мире: М. Кретца, М. Т. Уразбаева, Грастофа, М.К. Демьянова, Н.П. Петрова, Н.Е. Жуковского, О. Кеммерера, А. Фебера, А. Фридриха, Е.А. Иванова, В.А. Добровольского, Е.М. Гутьяра, Хамеля, М.В. Цепляева, В.С. Полякова, Е.Г. Глухарева, П.М. Огибалова, А.Л. Рабиновича, М.Н. Федотова, Б.Л. Давыдова, Чжу-Ши-юй, Г.М. Бартенева, В.И. Чуканова, Л.В. Андреева, Л.И. Колчина, А.Ю. Ишлинского, в том числе сотрудников НГУ, Днепропетровского национального университета и Института геотехнической механики АНУ: К. Полякова, В.И. Масаковского, И.Г. Штокмана, Н.Я. Биличенка, В.К. Смирнова, Р.В. Кирия и многих др. в области уточнения уравнения Эйлера в задаче о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку и определения их фрикционных характеристик его уравнение для идеального гибкого тела (невесомой, нерастяжимой и абсолютно гибкой нити) по-прежнему считалось самым совершенным.

Однако, укоренившиеся в сознании специалистов основополагающие представления о трении гибких тел по неподвижному блоку с некоторых пор получили развитие.

Уже давно ученые заметили подобие некоторых законов, описывающих взаимодействие влияющих факторов в различных явлениях, например, в электро-магнитном и гравитационном полях. Похожесть этих законов свидетельствует о правильности установленных закономерностей. Поэтому, работа над созданием единой теории поля, которую начал А. Эйнштейн, активно продолжается, что, в случае успеха, будет свидетельствовать о новом этапе развития науки.

Следовательно, рассмотрим проблему трения гибких тел более широко, а именно в области внешнего и внутреннего трения твердого тела, переходящего во внешнее скольжение.

Первые научные рассуждения в области внешнего трения твердых тел обнаружены в записях Леонардо да Винчи (1452 – 1519), датированные второй половиной 15 века. Расчетная схема приведена на рис. 2.

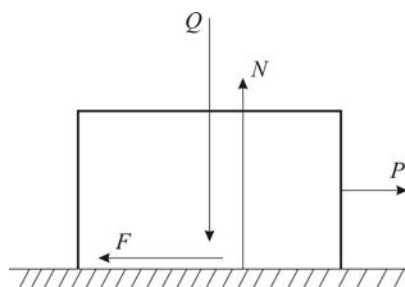


Рис. 2. Скольжение твердых тел: Q - нормальная составляющая силы прижима тел; N - нормальная реакция между телами; F - сила трения между телами; P - сила, приложенная к телу, поддерживающая равномерное движение одного тела относительно другого.

В работах Леонардо да Винчи указано на прямую пропорциональность сопротивления трения от нагрузки на трущиеся поверхности тел, которая приведена на рис. 3.

Коэффициент пропорциональности между этими силами, равный отношению силы трения к нагрузке, называется коэффициентом трения, который не зависит от площади контакта. Как ученый он опередил своих коллег на века, отчасти, поэтому его работы были забыты и указанный закон трения твердых тел был переоткрыт французским ученым Г. Амонтоном через 180 лет в 1699 году:

$$F = f \cdot N, \quad (4)$$

где F - сила трения между телами; N – нормальная составляющая силы прижатия тел друг к другу (нагрузка); f – коэффициент трения между телами.

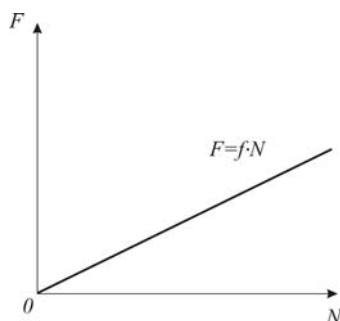


Рис. 3. Зависимость силы P , поддерживающей равномерное скольжение тела (силы трения F), от нормальной составляющей силы прижима тел Q (нормальной реакции между телами N): Q - нормальная составляющая силы прижима тел (нормальная реакция между телами N); P - сила, приложенная к телу, при равномерном движении одного тела относительно другого (сила трения F).

В 1779 году, после выода в 1775 г. закона трения гибких тел Эйлера, описаного выше, французский физик Кулон в результате большого количества экспериментов впервые установил новый закон трения твердых тел, который господствует до настоящего времени. Он обнаружил, что коэффициент трения зависит от материала трущихся тел, шероховатости их поверхностей длительности контакта и скорости скольжения. Несколько позже Сан-Винс установил, что величина силы трения для твердых волокнистых материалов возрастает с увеличением скорости и что коэффициент трения убывает с увеличением нагрузки.

Аналитически зависимость силы трения F от нормальной реакции N между телами (нормального прижатия тел Q) с достаточной для практики точностью связаны между собой линейной, но не прямо пропорциональной, как полагали Леонардо да Винчи и Амонтон, а двухпараметрической зависимостью:

$$F = F_0 + N \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (5)$$

где F_0 - сила трения между телами, когда нормальная реакция между телами равна нулю; $\operatorname{tg} \beta$ - коэффициент пропорциональности между силами трения и нормальной реакции тел; β - угол наклона зависимости между силами трения и нормальной реакцией.

На рис. 4. приведена графическая интерпретация закона трения тел Кулона:

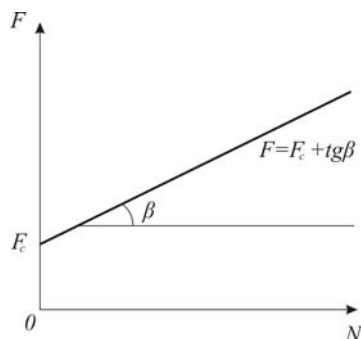


Рис. 4. Зависимость силы трения F от нормальной реакции между телами N : N - нормальная реакция между телами; F - сила трения между телами; F_0 - сила трения между телами, когда нормальная реакция между телами равна нулю; $\operatorname{tg} \beta$ - коэффициент пропорциональности между силами трения и нормальной реакцией тел; β - угол наклона зависимости между силами трения и нормальной реакцией между телами.

Теперь рассмотрим процессы, характерные для внутреннего трения тел. Под воздействием внешней нагрузки на тело возникает его деформация – происходит внутреннее трение в теле. При предельных критических напряжениях в теле наблюдается его разрушение – внутреннее трение переходит во внешнее по поверхности разрушения. Эти напряжения носят название предела прочности.

Согласно современным представлениям разрушение тела – это разрыв связей между частицами кристаллической решетки и молекулами. Силы, необходимые для разрыва связей зависят от межатомных взаимодействий и строения кристаллической решетки вещества, а также наличия различных дефектов – вакансий, дислокаций, границ зерен, пор и др.

Рассмотрим наиболее распространенную теорию прочности Мора, используемую в горной науке применительно к горным породам, которая наиболее полно согласуется с экспериментальными данными о прочности пород. Она основана на зависимости между предельными удельными касательными и нормальными силами - напряжениями в каждой точке тела, находящегося в сложно-напряженном состоянии.

Основное положение теории Мора заключается в том, что разрушение тела обусловлено не отдельно касательными или нормальными напряжениями, а совместным их действием.

При этом зависимость между предельными удельными нормальными и тангенциальными силами - предельными нормальными и тангенциальными напряжениями тела, которая получила название паспорта прочности горных пород. Для первого квадранта декартовой системы координат где действуют усилия сжатия на некотором начальном участке, примыкающем к оси координат, зависимость с достаточной для практики точностью представляется линейной двухпараметрической функцией вида:

$$\tau = K_{cu} + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

где τ – предельные тангенциальные напряжения в теле; K_{cu} - предел прочности породы при срезе в условиях отсутствия нормальных напряжений, называемый сцеплением породы; σ - предельные нормальные напряжения в теле; φ - угол внутреннего трения; $\operatorname{tg} \varphi$ - коэффициент пропорциональности между приращениями нормальных и тангенциальных разрушающих напряжений. называемый коэффициентом внутреннего трения.

Анализ рассмотренных законов свидетельствует о том, что законы трения твердых тел Леонардо да Винчи (Амонтона) и Кулона и предельная зависимость прочности пород Мора, описывающие внешнее и внутреннее трение, содержат единую по назначению силу нормального прижатия или удельного сжатия тел, а также подтверждают их линейную связь с соответствующей силой, приводящей в движение тело или деформирующей его. Кроме того, господствующие в настоящее время закон трения тел Кулона и зависимость прочности пород Мора содержат силу внешнего трения F_0 или удельную тангенциальную силу внутреннего трения при срезе K_{cu} в условиях отсутствия нормальной силы прижатия тел или сжатия тела, которые обусловлены действием соответствующих сил молекулярного взаимодействия между телами или сил связи между частицами тела.

Следовательно, указанные действующие законы внешнего и внутреннего трения тел, описывающие взаимодействие влияющих факторов, подобны по влияющим факторам и линейной связи между собой, что свидетельствует об их правильности.

Однако, закон трения гибких тел Эйлера, рассмотренный выше, количественно выходит за пределы установленного общего характера действующих законов в области внешнего и внутреннего трения тел.

Уравнение Эйлера не содержит общепризнанных факторов внешнего трения тел, а именно нормальной реакции между гибким телом и блоком и молекулярной составляющей силы трения между телами. Оно также указывает на показательную связь силы трения с коэффициентом трения и усилием натяжения гибкого тела на блоке в точке сбегания, а не линейную с общепринятой нормальной реакцией между телами и не учитывает центробежные силы гибкого тела.

Вместе с тем, понимание природы трения гибких тел по блоку, сложившееся у специалистов, идентичное механизму трения твердых тел. Ведь гибкое тело является твердым. Сила трения между гибким телом и блоком возникает в результате его прижатия под действием усилий натяжения гибкого тела, приложенных к его концам, и зависит от фрикционных свойств, что предполагает линейную зависимость от силы прижатия гибкого тела к блоку. Но этого в уравнении Эйлера не наблюдается.

В то же время в 2007 г. в НГУ получено решение задачи о скольжении гибкого тела по блоку на основании новых знаний о трении тел – законов трения тел Кулона и сохранения механической энергии в замкнутой механической системе, введенных после выводов Эйлера. Решение задачи осуществлено в рамках консервативной механической системы, в которой соблюдается закон сохранения механической энергии, отвечает господствующему закону трения тел Кулона и учитывает влияния центробежных сил гибкого тела [4,5]. Полученное уравнение трения гибких тел преодолевает недостатки, присущие уравнению Эйлера, согласуется с накопленными данными практики, учитывает центробежные силы гибкого тела и содержит общепризнанные влияющие факторы действующих законов внутреннего и внешнего трения тел. Оно содержит нормальную реакцию между телами, выраженную опосредованно, и молекулярную составляющую силы трения между телами, а также подтверждает их линейную связь с силой трения, что свидетельствует о его правильности.

При использовании параметров трения тел Кулона полученное уравнение имеет такой вид:

$$F = S_1 - S_2 = F_c + tg\beta \cdot \left(\varphi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2} \right) = F_c + tg\beta \cdot N. \quad (7)$$

где F_c - сила трения, когда нормальная реакция равна нулю; N – нормальная реакция между телами; $tg\beta$ - коэффициент пропорциональности между силой трения и нормальной реакцией; β - угол наклона зависимости; f – коэффициент трения скольжения между телами.

При использовании коэффициента трения, распространенного в практике:

$$F = S_1 - S_2 = \left(\frac{F_c}{N} + tg\beta \right) \cdot N = f \cdot N = f \cdot \left(\varphi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2} \right). \quad (8)$$

где $f = \left(\frac{F_c}{N} + tg\beta \right)$

Таким образом, новые знания о трении гибких тел восстанавливает традиционное представление о прямом влиянии на трение гибких тел молекулярной составляющей силы трения, нормальной реакции между телами и его фрикционных свойств.

Поэтому, при проектировании и эксплуатации машин с гибким тяговым органом необходимо использовать восстановленные представления о трении гибких тел, которые распространяются на реализацию и определение их тяговой способности и необходимы для обоснования рациональных режимов работы.

Список литературы

1. Андреев А.В. Передача трением. – М.: Машгиз, 1963. – 112 с.
2. РТМ 24.093.04-80. Проектирование стационарных ленточных конвейеров общего назначения. - 1980.
3. Картавий Н.Г. Стационарные машины. Учебник для вузов. - М.: Недра, 1981. - 327с.
4. Лубенец Н.А. Альтернативный формуле Эйлера закон реализации тягового усилия трением / Лубенец Н.А. // Науковий вісник НГУ–Д, 2008.–№ 11.- С.67–70.
5. Лубенец Н.А. Влияние центробежных сил гибкого тела на реализацию тягового усилия трением. / Лубенец Н.А., Лубенец Т.Н. // Науковий вісник НГУ, № 5. – Дніпропетровськ, 2012. – с. 28 – 33.