

УДК 531.44:626.8:631.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ НАКЛОННОГО СКОЛЬЖЕНИЯ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ О НАПРАВЛЯЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН

В. И. ПЕТРОЧЕНКО

Институт водных проблем и мелиорации НААН Украины,
г. Киев, Украина, 03022, e-mail: v_petr47@ukr.net

(Поступила в редакцию 04.06.2018)

В сельскохозяйственных и мелиоративных машинах для передачи движения от ведущего к ведомому звену широко используют клиновые и ленточные ремни, канаты и прочие гибкие элементы с фрикционным сцеплением (трением). Основным расчетным параметром передаточных механизмов с гибкими фрикционными связями является сила трения между гибкими элементами и рабочими поверхностями барабанов, шкивов, блоков. Для определения этой силы используют известную формулу, выведенную еще в 18 столетии Л. Эйлером. Ее используют в расчетах не только передаточных механизмов с гибкими связями, но и конструктивно-технологических параметров процессов укладки дренажа из дренажных плетей, кабелей и прочих гибких материалов [1–5].

Установлено, что для определения силы трения гибкого элемента о цилиндрическую поверхность формула Л. Эйлера может быть использована только при условии скольжения гибкого элемента в плоскости перпендикулярной оси цилиндрической поверхности. При наклонном скольжении гибкого элемента по направляющей цилиндрической поверхности траектория движения каждой точки гибкого элемента не лежит в одной плоскости. Теоретическими и экспериментальными исследованиями процесса наклонного скольжения гибкого элемента по цилиндрической поверхности получена формула силы трения наклонного скольжения гибкого элемента. Приведены основные рекомендации расчета процесса наклонного скольжения рулонной пленки при ее укладке рабочими органами мелиоративных машин.

Ключевые слова: гибкий элемент, наклонное скольжение, сила трения, рулонная пленка, мелиоративная машина.

In agricultural and land reclamation machines, they widely use wedge and band belts, ropes and other flexible elements with friction clutch (friction) to transfer movement from the lead to the driven link. The main design parameter of transfer mechanisms with flexible friction bonds is the frictional force between the flexible elements and working surfaces of drums, pulleys, and blocks. To determine this force, they use the well-known formula, derived in the 18th century by L. Euler. It is used in calculations of not only transfer mechanisms with flexible connections, but also structural and technological parameters of installation of drainage from drainage lintels, cables and other flexible materials. It is established that to determine the frictional force of a flexible element against a cylindrical surface, Euler's formula can only be used if the flexible element slides in the plane perpendicular to the axis of cylindrical surface. When the flexible element slides aslant along the guide of cylindrical surface, the trajectory of each point of the flexible element does not lie in the same plane. Theoretical and experimental studies of the process of oblique sliding of the flexible element along a cylindrical surface yielded a formula for the frictional force of an inclined slide of the flexible element. We have presented the main recommendations for calculating the process of oblique sliding of a roll film when it is laid by the working bodies of melioration machines.

Keywords: flexible element, inclined sliding, frictional force, roll film, melioration machine.

Введение

Формула Л. Эйлера применима только в случае скольжения гибкого элемента в плоскости перпендикулярной образующей цилиндрической поверхности. Так, в сельскохозяйственном машиностроении ее используют преимущественно в расчетах ременных передач. Но в некоторых технологических процессах возникает необходимость перемещения (подачи) гибких нитяных или ленточных материалов путем их наклонного скольжения по направляющим поверхностям рабочих органов машин или иного технологического оборудования. При наклонном скольжении гибкого элемента по направляющей цилиндрической поверхности траектория движения каждой точки гибкого элемента не лежит в одной плоскости, поскольку она имеет не две, а три переменные координаты.

Актуальность исследований силы наклонного скольжения гибких элементов по направляющим поверхностям машин возникла сравнительно недавно, когда появились новые конструктивные решения применения в мелиоративном строительстве полимерной противофильтрационной пленки и принципиально новые технические решения рабочих органов ее механизированной укладки.

Целью исследования является теоретическое и экспериментальное определение силы трения наклонного скольжения рулонных материалов о направляющие поверхности мелиоративных машин.

Основная часть

В связи с развитием химической промышленности, с начала 60-х годов минувшего столетия, во многих странах мира стали широко применять полимерную пленку в качестве конструкционного материала различных противофильтрационных сооружений [6, 7]. Одновременно с применением в гидромелиорации полимерных пленок совершенствовались конструктивно-технологические решения их укладки. Научные исследования велись как в направлении создания новых видов полимерных пленок, так и в направлении разработки специальных рабочих органов механизированной укладки пленки с целью снижения трудоемкости строительных процессов.

Был предложен ряд новых технических решений выполнения механизированной укладки пленочных противофильтрационных завес [8, 9 и др.]. На рис. 1 по техническому решению [8] показан опытный образец бестраншейного укладчика пленочных завес и схема укладки пленки. При рабочем

перемещении базовой машины нож 1 прорезает в грунте щель, в которой движется полый треугольный пленкопротяжный кожух 2, содержащий пластину разворота пленки 3. При движении машины с рулона 5 сматывается пленка, которая в виде набегающей ветви 6 поступает в полость кожуха 2, разворачивается на пластине 3 под углом φ к плоскости поперечного сечения пластины 3 и в виде сбегающей ветви 7 образует в грунтовой щели необходимую противофильтрационную завесу.

Очевидно, что при наклонном (под углом φ) скольжении пленки по поверхности пластины 3 сила трения скольжения пленки не может быть рассчитана по формуле Л. Эйлера.

Предложено также техническое решение [10] бестраншейного укладчика, выполняющего укладку пленочных лотковых увлажнителей в легких водопроницаемых песчаных грунтах, в котором разворот пленки в полости рабочего органа происходит по более сложной схеме.

Надежность работы укладчиков зависит от геометрических параметров расположения в пространстве деталей разворота пленки, которые рассчитывают на стадии проектирования рабочих органов, а также зависит от силы натяжения пленки на выходе ее из полости рабочих органов.

Сила натяжения пленки на выходе из полости рабочих органов зависит от сил трения ее наклонного скольжения на каждой ступени разворота. При этом, ввиду малой прочности на разрыв материала пленки, сила ее натяжения на выходе из полости рабочих органов является важным критерием оценки работоспособности укладчиков пленочных сооружений.

Для определения силы трения наклонного скольжения гибкого элемента (нити) о направляющую цилиндрическую поверхность рассмотрим схемы, показанные на рис. 1. Гибкая нить имеет начальную A_n и конечную A_c точку соприкосновения с цилиндрической поверхностью. Точка A_n является конечной точкой набегающей ветви нити и начальной точкой траектории ее скольжения. Точка A_c является конечной точкой траектории скольжения и начальной точкой сбегающей ветви гибкой нити. Движение точек гибкой нити по траектории $A_n A_c$ является сложным. Оно состоит из поворота радиус-вектора $O_n R$ на угол α (перемещение из точки A_n в точку A_α) и перемещения по образующей цилиндрической поверхности на расстояние $A_\alpha A_c$.

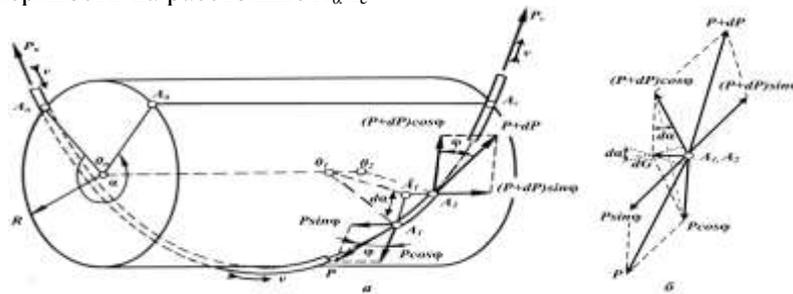


Рис. 1. К определению силы трения наклонного скольжения гибкой нити о цилиндрическую поверхность: а – схема наклонного скольжения гибкой нити; б – силы, действующие на элементарный участок гибкой нити

Рассмотрим элементарный участок гибкой нити $A_1 A_2$, которому соответствует поворот радиус-вектора $O_1 A_1$ на угол da (перемещение из точки A_1 в точку A_1) и перемещение по образующей цилиндрической поверхности на расстояние $A_1 A_2$.

На элементарный участок гибкой нити $A_1 A_2$ действует элементарная сила трения:

$$dF = (P+dP) - P = dP. \quad (1)$$

Предположим, что в точке A_1 гибкая нить расположена под углом φ к нормальному сечению цилиндрической поверхности. Докажем, что на всем участке гибкой нити $A_1 A_2$ угол φ не изменяется. Допустим обратное, тогда гибкая нить в точке A_2 расположится под углом $\varphi+d\varphi$ к нормальному сечению цилиндрической поверхности.

Запишем уравнение равновесия сил, действующих на участок гибкой нити $A_1 A_2$ вдоль оси $O_1 O_2$:

$$(P+dP)\sin(\varphi+d\varphi) - P\sin\varphi - dF\sin(\varphi+\lambda d\varphi) = 0, \quad (2)$$

где λ – коэффициент, величина которого задана интервалом $0 < \lambda < 1$ и определяет точку приложения элементарной силы трения dF .

Учитывая, что $dF = dP$, а $P \gg dP$, уравнение (2) можно заменить системой уравнений:

$$P[\sin(\varphi+d\varphi) - \sin\varphi] = 0; \quad (3)$$

$$dP[\sin(\varphi+d\varphi) - \sin(\varphi+\lambda d\varphi)] = 0, \quad (4)$$

откуда следует, что $d\varphi=0$.

Можно показать, что для другого элементарного участка, граничащего с $A_1 A_2$, $d\varphi=0$. Применяя метод математической индукции, несложно установить, что для любого участка нити $d\varphi=0$, $\varphi=const$. Это значит, что траектория наклонного скольжения гибкой нити $A_n A_c$ является винтовой линией.

Ввиду бесконечно малых линейных размеров элементарного участка гибкой нити $A_n A_c$, совместим его конечные точки A_n и A_c и определим элементарную силу давления dG участка гибкой нити $A_n A_c$ на цилиндрическую поверхность, пользуясь схемой на рис. 3б:

$$dG = 2P \cos\varphi \sin \frac{d\alpha}{2}. \quad (5)$$

Заменив синус бесконечно малого угла самим углом ($d\alpha/2$), получаем:

$$dG = P \cos\varphi d\alpha. \quad (6)$$

Элементарная сила трения равна:

$$dF = f dG, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения материала нити о цилиндрическую поверхность.

Подставив в уравнение (7) значение dG из (6) и учитывая, что $dF = dP$, получаем:

$$dP = f P \cos \varphi d\alpha. \quad (8)$$

Разделив переменные, проинтегрируем полученное уравнение:

$$\int_{P_n}^{P_c} \frac{dP}{P} = \int_0^{\alpha} f \cos \varphi d\alpha \rightarrow \ln P \Big|_{P_n}^{P_c} = f \cos \varphi \alpha \rightarrow \ln \frac{P_c}{P_n} = f \cos \varphi \alpha \rightarrow \frac{P_c}{P_n} = e^{f \cos \varphi \alpha}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) получаем:

$$P_c = P_n e^{f \cos \varphi \alpha}. \quad (10)$$

В частном случае при $\varphi=0$ (скольжение в плоскости перпендикулярной образующей цилиндрической поверхности) формула (10) превращается в известную формулу Л. Эйлера:

$$P_c = P_n e^{f \alpha}. \quad (11)$$

Используя формулу (10), определяем силу трения наклонного скольжения гибкой нити:

$$F = P_c - P_n = P_n (e^{f \cos \varphi \alpha} - 1). \quad (12)$$

Для подтверждения достоверности полученной теоретическим путем формулы (10), были выполнены экспериментальные исследования. Определяли соотношения сил P_n и P_c при различных углах наклонного скольжения гибкого элемента по поверхности скругленной кромки пластины, смонтированной на специально изготовленной экспериментальной установке.

В качестве гибкого элемента использовали гибкую ленту шириной 100 мм, выполненную из полиэтиленовой пленки (ГОСТ 10354-82) толщиной: 0,1; 0,2 и 0,5 мм. Во всех опытах разворот гибкой ленты осуществляли на пластинах толщиной: 2; 6 и 12 мм. Гибкой лентой обворачивали пластину, а концы ленты в виде набегающей и сбегающей ветвей сматывали в рулоны, оси которых установлены на упругих стойках с тензодатчиками. Во всех опытах угол α был постоянным ($\alpha=\pi$), а угол наклонного скольжения φ составлял: 0° ; 15° ; 30° ; 45° и 60° .

Экспериментальные исследования выполняли в такой последовательности. При угле $\varphi=0^\circ$ производили тарировку тензодатчиков и путем приложения к осям рулонов и фиксированных нагрузок. Устанавливали необходимый угол наклонного скольжения φ . Включали запись осциллографа. Поворачиванием рукоятки на рулон наматывали сбегающую ветвь. Одновременно путем приложения варьируемого момента трения $M_{\text{тр}}$ к барабану тормозили вращение рулона и тем самым создавали варьируемую силу P_n натяжения набегающей ветви.

Во время вращения рулонов и синхронно записывались осциллограмма 1 (рис. 2) силы P_n натяжения набегающей ветви гибкой ленты и осциллограмма 2 силы P_c натяжения сбегающей ветви.

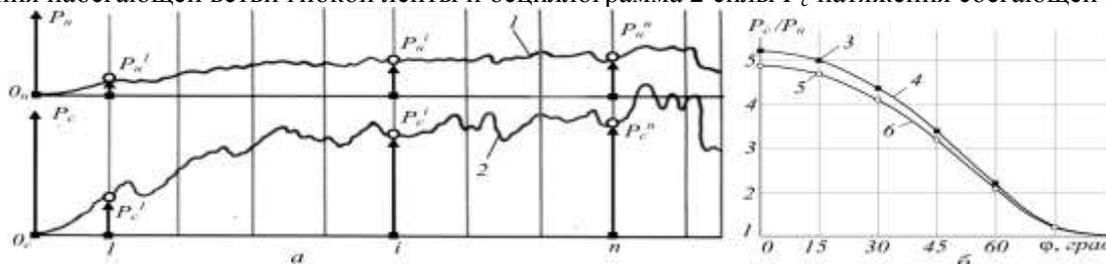


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований сил P_n и P_c натяжения набегающей и сбегающей ветвей гибкой ленты: a – совмещенные во времени осциллограммы сил P_n и P_c при $\alpha=\pi$, $\varphi=\pi/4$, $P_n=var$; b – зависимость соотношения сил P_c/P_n от угла наклонного скольжения φ ; 1 – осциллограмма силы P_n натяжения набегающей ветви гибкой нити; 2 – осциллограмма силы P_c натяжения сбегающей ветви гибкой нити; 3 – экспериментальные точки соотношения P_c/P_n ; 4 – график зависимости соотношения P_c/P_n от угла φ , построенный по экспериментальным точкам 3; 5 – расчетные значения соотношения P_c/P_n при $\alpha=\pi$, $f=0,5$; 6 – график зависимости соотношения P_c/P_n от угла φ , построенный по расчетным точкам 5

Обработку записей осциллографа выполняли путем проведения вертикальных линий, пересекающих синхронно записанные осциллограммы 1 и 2, что дало возможность на каждой i -й вертикальной линии по точкам пересечения определять экспериментальные данные P_c^i и P_n^i сил P_c и P_n . На основе анализа осциллограмм 1 и 2 было установлено, что $P_c^i / P_n^i \cong \text{const}$ для любых значений φ . Это дало возможность для каждого угла φ соотношение сил P_c и P_n определять по формуле:

$$P_c / P_n = \sum_{i=1}^n P_c^i / P_n^i. \quad (13)$$

Результаты экспериментальных исследований показали, что на величину P_c / P_n не влияет толщина пластины разворота гибкой ленты и толщина гибкой ленты. На величину P_c / P_n , а следовательно, и силу трения наклонного скольжения F , влияет угол наклонного скольжения φ . Для сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований при фиксированных параметрах $\alpha=\pi$ и $\varphi=\pi/4$, на рис. 2б приведены графики 4 и 6, имеющие сходную конфигурацию.

График 4 построен по экспериментальным точкам 5. Обработкой результатов эксперимента методом наименьших квадратов установлено, что график 4 отображает функцию $P_c = P_n e^{0,53 \cos \varphi \alpha}$. График 6 построен по рассчитанным по формуле (10) точкам 5 при $f=0,5$. Идентичность конфигурации графиков 4 и 6 свидетельствует о соответствии результатов теоретических и экспериментальных

исследований, а их некоторое расхождение поясняется несоответствием фактического (0,53) и принятого в расчетах (0,5) коэффициентов трения гибкой ленты о сталь.

Формула (10) может быть использована при расчете параметров рабочего органа или иного технологического оборудования, содержащего одну поверхность наклонного скольжения гибкого нитяного или ленточного элемента, например, в укладчике.

Если же имеется несколько поверхностей скольжения гибкого элемента, например, в укладчике их двое ($m=2$), и при этом на каждой j -й поверхности скольжения параметры скольжения гибкого элемента f_j , ϕ_j , α_j могут отличаться, то расчетную (наибольшую) силу натяжения P_{cm} ветви, сбегаящей с последней m -й поверхности скольжения, рассчитывают по формуле:

$$P_{cm} = P_{n1} \exp \sum_{j=1}^m f_j \cos \phi_j \alpha_j, \quad (14)$$

где P_{n1} – сила натяжения ветви гибкого элемента, набегающей на первую поверхность скольжения, Н. В укладчиках рулонной пленки (рис. 1) силу P_{n1} рассчитывают по формуле:

$$P_{n1} = \frac{J_r \varepsilon + M_{mp}^{on}}{r}, \quad (15)$$

где r – радиус слоя пленки, с которого происходит его разматывание, м; J_r – зависящий от радиуса r момент инерции рулона с пленкой относительно его оси, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ε – максимальное угловое ускорение рулона при разматывании пленки, с^{-2} ; M_{mp}^{on} – момент трения в подшипниковых опорах, Н·м.

Пленка из полости рабочих органов будет выходить без потери ее качества при условии:

$$\frac{P_{cm}}{b\delta} < \sigma_m, \quad (16)$$

где b и δ – ширина и толщина полосы пленки, м; $[\sigma_m]$ – предел текучести материала пленки, Па.

Подставив значение P_{n1} из (15) в (14), а затем значение P_{cm} из (14) в (16) имеем зависимость для расчета параметров качественной укладки рулонной пленки мелиоративными машинами:

$$\frac{J_r \varepsilon + M_{mp}^{on}}{r} < \frac{b\delta \sigma_m}{\exp \sum_{j=1}^m f_j \cos \phi_j \alpha_j}. \quad (17)$$

Заключение

С применением в гидромелиорации полимерных пленок возникла потребность разработки средств их механизированной укладки. Предложено ряд технических решений укладчиков, позволяющих укладывать в грунт рулонные пленочные материалы по схемам, предусматривающим сложное наклонное скольжение пленки по направляющим поверхностям рабочих органов мелиоративных машин. При этом сила трения наклонного скольжения пленки существенно влияет на работоспособность укладчиков пленки, но она не может быть определена по формуле Л. Эйлера, поскольку траектория наклонного скольжения гибкого элемента имеет три переменные координаты.

Выполнены теоретические исследования, в результате чего была получена более общая, по сравнению с формулой Л. Эйлера, формула для расчета силы трения скольжения гибкого элемента при произвольном угле его наклона к направляющей цилиндрической поверхности.

Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальными исследованиями.

Получены основные зависимости расчета параметров процесса механизированной укладки пленки, которые могут быть использованы при проектировании рабочих органов мелиоративных машин, а также другого технологического оборудования подачи и укладки гибких материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, А. В. Передача трением / А. В. Андреев. – М.: Машгиз, 1963. – 112 с.
2. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов / С. М. Тарг. – М., 1998. – 416 с.
3. Казаков, В. С. Механизация строительства закрытого дренажа на осушаемых и орошаемых землях / В. С. Казаков, Е. Д. Томин. – М.: Россельхозиздат, 1969. – 132 с.
4. Томин, Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа / Е. Д. Томин. – М.: Колос, 1981. – 240 с.
5. Хайзерук, Е. М. Кабелеукладчики. Вопросы теории и расчета / Е. М. Хайзерук. – М., 1974. – 198 с.
6. The first plastic lining is installed in New South Wales. – Power Farming and Better Farming Digest an Australia and New Zealand, 1958, №7 – p. 131.
7. Панасенко, Г. А. Применение пластмассовых пленок в качестве противofильтрационных покрытий / Г. А. Панасенко // Гидротехническое строительство. – 1967. – №1. – С. 55–57.
8. А.с. 1666623 /СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Устройство для укладки вертикальной противofильтрационной завесы / В. И. Петроченко; заявл. 24.07.89; опубл. 30.07.91, Бюл. № 28.
9. А.с. 1698351 /СССР/ МПК Е 02 В 3/16 Устройство для образования противofильтрационной завесы / В. И. Петроченко, В. И. Снисаренко, Ю. В. Бунча; заявл. 30.01.90; опубл. 15.12.91, Бюл. № 46.
10. А.с. 833267 /СССР/ МПК Е 02 F 5/10 Устройство для укладки дренажа из пленки / В.И. Петроченко; заявл. 06.09.78; опубл. 23.11.81, Бюл. № 43.
11. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Турчин [и др.]. – Л: Энергия, 1975. – 576 с.