

ВЛИЯНИЕ ГРУПП ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ СЕМЯН ПО ФРИКЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СЕПАРАТОРОВ

Степан Ковалишин, Юрий Ковальчик, Виктор Дадак

Львовский национальный аграрный университет

Ул. В. Великого 1, Дубляны, Украина. E-mail: kovalyshyn@mail.ru

Stepan Kovalyshyn, Yuriy Kovalchik, Viktor Dadak

Lviv National Agrarian University

St. Volodymyr the Great 1, Dubliany, Ukraine. E-mail: kovalyshyn@mail.ru

Аннотация. Теоретически определен тип контакта в условиях трения семенных смесей при их разделении сепараторами. На основании известных соотношений обоснован выбор групп трибологических параметров, влияющих на коэффициенты трения скольжения семенных смесей по фрикционных поверхностях сепараторов. Выделены параметры шероховатости, характерные для исследования процессов трения на уровне фактических площадей контакта. Обосновано их влияние на коэффициенты трения как деформационной, так и молекулярной составляющих силы трения. Показано, что деформационная составляющая силы трения для семян будет преобладать над молекулярной составляющей. Исключено влияние групп параметров, описывающих т.н. «третье тело».

Проведенные исследования определяют последующие шаги дальнейших экспериментальных и теоретических исследований трения семенных смесей.

Ключевые слова. Семенные смеси, процесс сепарирования, коэффициент трения, фактическая площадь контакта, шероховатость, триботехнические параметры, упругий ненасыщенный контакт.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Очистка, разделение и сортировка семян сельскохозяйственных культур преимущественно происходят в процессе их послеуборочной обработки [1]. Для получения положительного эффекта и высококачественного семенного материала важная роль отводится взаимодействию его компонентов с рабочими органами семяоочистительных машин и влиянию на этот процесс коэффициентов трения различных составляющих семенных смесей [1, 2]. В данном случае коэффициенты трения, которые используют как своеобразный инструмент их очистки, выступают как основной параметр разделения семян по качеству их очистки от примесей, извлечения из них трудноотделимых примесей сорняков и разного рода травмированных семян культурных растений [11, 15].

В то же время сами коэффициенты трения также зависят от ряда трибологических параметров, которые описывают физико-механические свойства как семян, так и фрикционных поверхностей сепараторов [2, 3, 10]. Однако на данный момент исследо-

вателями недостаточно внимания уделяется теоретическим и практическим исследованиям по обоснованию и определению влияния групп триботехнических параметров на величину коэффициентов внешнего трения семян в условиях их сепарирования [22].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Комплексные исследования физико-механических свойств семян включают в себя также определение их коэффициентов трения [1, 3, 5, 11]. Преимущественно представлены экспериментальные исследования, направленные на определение статических и динамических коэффициентов внешнего трения семян [2, 4, 6]. Авторы этих исследований ставят себе цель экспериментального нахождения коэффициентов трения скольжения компонентов семенных смесей сельскохозяйственных культур, в том числе и засорителей, по различных материалах фрикционных поверхностей [1, 2, 10]; расчет значений коэффициентов трения покоя через максимальный угол наклона фрикционной плоскости, при котором зерно начинает двигаться [2, 4, 5, 14]; выявление корреляционной связи между коэффициентами трения с различными биологическими характеристиками, например, уровнем произрастания семян, степенью травмированности семян, их шуплостью [8, 13, 18, 21]. При этом используются различные типы установок для определения углов наклона фрикционных поверхностей и коэффициентов внешнего трения, которые дают неодинаковые уровни точности измерений [2, 4, 10, 19, 20].

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости теоретического и экспериментального определения групп триботехнических параметров, которые непосредственно влияют на коэффициенты трения семян по рабочим поверхностям сепараторов, поскольку такие исследования практически отсутствуют.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данных исследований является усовершенствование рабочих органов сепараторов путем определения и учета при их проектировании триботехнических параметров, влияющих на коэффициенты трения и фрикционные свойства семян.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Вследствие неровностей поверхностей контакта твердых тел, в том числе номинально плоских, их взаимодействие происходит на отдельных участках. Поэтому для изучения физико-механических закономерностей трения и износа используются понятия номинальной, контурной и фактической площадей контакта поверхностей рис. 1. [9].

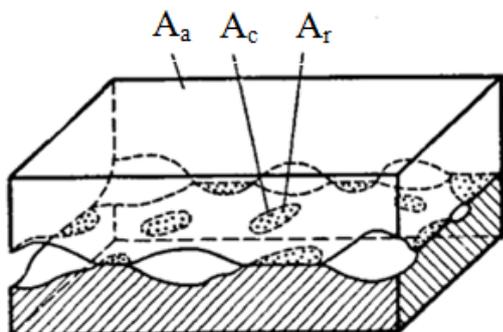


Рис.1. Виды площадей контакта фрикционных тел: A_a – номинальная площадь контакта; A_c – контурные площади контакта; A_r – фактические площади контакта.

Fig.1. Types of contact area the friction bodies:

A_a – nominal contact area; A_c – contour area of contact; A_r – actual contact area.

Вследствие макро- и микро- неровностей поверхностей контакт тел трения происходит на вершинах микронеровностей, что приводит к их деформации - упругой или упруго-пластической и образованию участков фактического контакта. Площади этих участков и составляют суммарную фактическую площадь контакта [9]. Поскольку участки фактического контакта преимущественно расположены дискретными группами, они образуют так называемые контурные площади контакта. Номинальная площадь контакта совпадает с площадью всей поверхности контакта номинально плоских тел трения. При этом часто удобно считать, что у одного из тел поверхность неровная и шероховатая, а у другого - идеально ровная, которую моделируют с помощью гладких полупространства или полуплоскости. В зависимости от параметров внешней нагрузки - давления на номинально плоской поверхности контакта P и скорости скольжения тел трения v , а также физико-механических характеристик контактирующих тел, будет происходить взаимодействие более твердых микровыступов при их скольжении по абсолютно гладкой поверхности относительно мягкого контртела. Размеры участков фактического контакта обычно очень небольшие - их диаметр составляет от нескольких до нескольких сотен микрон. Очевидно, важна также конфигурация микронеровностей и закономерности их расположения, а также тип деформации в зонах контакта. В случае такого типа трения, когда сближение поверхностей контакта является относительно небольшим, с определенным приближением считают, что фактические площади контакта совпадают с сечением микровыступов. При дальнейшем сближении происходит увеличение не

площади единичных пятен контакта, а увеличение их числа [9, 16]. Поэтому расчет площадей фактического контакта, коэффициентов трения, а главное, деформации в зоне контакта, зависит от того, насыщенный или ненасыщенный тип контакта отвечает данным условиям.

Ненасыщенным контактом считается такая разновидность контакта твердых тел, при котором число контактирующих микронеровностей n_r меньше числа микронеровностей n_c , расположенных на контурной площади касания. Напротив, при насыщенном контакте это неравенство не выполняется. Причем, пластический насыщенный контакт наблюдается лишь при больших давлениях. Упругий насыщенный контакт имеет место, если ближайший в пределах контурной площадки контакта микровыступ будет контактировать с контртелом [9, 18]. Поскольку при сепарации на фрикционных сепарирующих элементах слой зерна достаточно тонкий [12, 17], то, учитывая малую массу семян, давление очень незначительное. При таких условиях в пределах контурных площадок контакта взаимодействуют не все микровыступы. Более того, при увеличении давления происходило бы истирание и повреждения семян, что крайне нежелательно при сепарации [10, 11]. Поэтому при скольжении семян по рабочих поверхностях сепараторов имеет место упругий ненасыщенный контакт. Таким образом, для вычисления фактической площади контакта при трении скольжения в условиях ненасыщенного контакта вводится коэффициент α , учитывающий напряженное состояние в зоне контакта и кинетические особенности взаимодействия твердых тел. Тогда фактическая площадь контакта будет равна:

$$A_r = \alpha A_c b \varepsilon^V, \quad (1)$$

где: A_c – контурные площади контакта; b, v – параметры опорной кривой профиля поверхности, определяемые расчетно-экспериментальным путем; ε – сближение поверхностей контакта:

$$\varepsilon = \frac{h}{R_{\max}}, \quad (2)$$

где: h – расстояние от сечения поверхности контакта, параллельно средней линии впадин и выступов, к вершине самого высокого микровыступа; R_{\max} – максимальная высота микронеровностей.

Характерным и распространенным типом деформации микронеровностей является вдавливание более жестких и меньших по размеру микронеровностей в мягкую менее жесткую поверхность контртела. В таком случае используют самую распространенную сферическую модель микровыступов, рис. 2., в предположениях которой фактическая площадь касания I микронеровности при ее внедрении на величину h_i отличается от ее площади сечения II, которая расположена на расстоянии h_i от вершины [9].

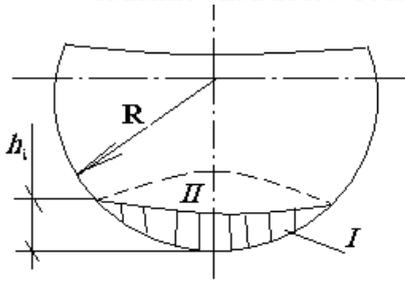


Рис. 2. Схема контакта микровыступов при вдавлении

Fig.2. The pin microprojections indentation

Но на самом деле, как свидетельствуют литературные данные [9], разница между этими площадями является незначительной и составляет 1-2%, особенно учитывая малую величину нагрузок при сепарации семян и условия ненасыщенного упругого контакта. Известно [9], что для сферической формы i -ой неровности площадь фактического соприкосновения вычисляются как:

$$A_{r_i} = \alpha_{\tau} 2\pi R h_i. \quad (3)$$

Следует отметить, что в условиях упругих деформаций в зонах фактического касания коэффициент $\alpha_{\tau} = 0,5$ [7, 9]. Преимущественно считают, что параметр шероховатости R_{z_1} для поверхности одного из тел трения примерно в 2 раза больше, чем соответствующий параметр R_{z_2} для поверхности другого контактирующего тела. В нашем же случае можно считать, что фрикционная поверхность сепаратора является абсолютно ровной. В случае упругого ненасыщенного контакта в зависимости от контактного давления p_c можно считать, что:

$$A_r \sim p_c^{0,8} \text{ и } h \sim p_c^{0,4}, \quad (4)$$

где: $P_c = \frac{N}{A_c}$, N – сила, действующая на контактирующие поверхности.

Вычислим контурное давление, используя комплексный параметр Δ , характеризующий шероховатость поверхности:

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{1 - Rb^{\nu}}, \quad (5)$$

где: R – высота сферической микронеровности.

Для сферической модели микровыступов считают, что происходит внедрение более жесткой микронеровности в поверхность менее жесткого тела. Также допускают контактирование двух твердых тел, одно из которых является абсолютно жестким и имеет шероховатую поверхность, а другое сравнительно более мягкое и моделируется абсолютно ровной поверхностью. Тогда, используя теорию Герца и данные [9], при расчетах принимают, что в машиностроении, а таким образом, и для поверхностей сепараторов, наиболее распространенные виды опорных поверхностей характеризуются значениями параметров $\nu=2$ и $b=2$. В условиях упругого ненасыщенного контакта контурное давление находят по формуле:

$$p_c = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{0,4 E \Delta^2 \varepsilon^4}{5}, \quad (6)$$

где: E – модуль упругости менее жесткого материала; μ – коэффициент Пуассона.

Следует учитывать, что при перемещении шероховатого зерна в условиях его сепарирования по относительно гладкой шлифованной поверхности именно поверхность зерна образует микровыступы, а металлическую поверхность сепаратора тогда следует считать абсолютно ровной. Однако открытым остается вопрос, какое из тел контакта следует моделировать, как более жесткое, и возможно ли в этом случае использование задачи Герца. Для нас принципиально важны используемые триботехнические параметры для фактических площадей контакта, а также наличие в последней формуле модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Известно [9], что внешнее трение имеет двойственную природу. С одной стороны поверхности сближаются на расстояния, при которых возможны межмолекулярные или даже межатомные взаимодействия между телами трения. Это приводит к появлению молекулярной составляющей силы трения. С другой стороны, при трении скольжения жесткая микронеровность деформирует материал поверхностных слоев менее жесткого тела. Такое взаимодействие приводит к возникновению деформационной составляющей силы трения. Тогда силу трения, которая возникает на отдельной микронеровности, можно представить как:

$$F = F_M + F_g, \quad (7)$$

где: F_M, F_g – соответственно молекулярная и деформационная составляющие силы трения.

Обе силы являются функциями напряженного состояния в микроконтактах [9]. В случае скольжения зернового потока по поверхности сепаратора деформационная составляющая силы трения по абсолютной величине должна быть относительно небольшой вследствие небольших нагрузок, обусловленных малой массой семян. Кроме того, жесткость зерна с его неровной поверхностью значительно ниже, чем жесткость металлических фрикционных частей сепаратора. Молекулярная составляющая силы внешнего трения находится как:

$$F_M = \tau_n \cdot A_r, \quad (8)$$

где: τ_n – касательные напряжения в зонах фактического контакта твердых тел.

При этом надо учитывать, что молекулярная составляющая силы трения предположительно может быть ничтожной вследствие недостаточного расстояния для межмолекулярных взаимодействий при относительно небольшом сближении поверхностей семян и сепаратора.

Механическую составляющую коэффициента трения f в условиях упругого ненасыщенного контакта можно рассчитать по формуле [9]:

$$f = \frac{2,4\tau_0(1-\mu^2)R^{\frac{1}{2}}}{\nu(\nu-1)k_1Eh^{\frac{1}{2}}} + \beta + \frac{0,4\alpha_{ef}h^{\frac{1}{2}}}{k_1\nu(\nu^2-1)R^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

где: k_1 – постоянная интегрирования, которая зависит от параметров обработки поверхности,

$$\tau_0 = A(T_k)C_1 \exp \frac{B}{KT_k},$$

$$\beta = A(T_k)C_1 \frac{\gamma}{kT_k} \exp \frac{B}{KT_k}. \quad (10)$$

В свою очередь $A(T_k)$ – некоторая функция температуры, а T_k – температура, для которой согласно Френеля [9], находится коэффициент динамической вязкости η :

$$\eta = A(T_k) \exp \frac{\omega}{KT_k}, \quad (11)$$

где: ω – энергия активации вязкого течения жидкости; K – постоянная Больцмана; β, γ – коэффициенты, используемые при определении энергии вязкого течения;

$$\omega = \beta + \gamma p - \alpha(T_k - T_{k_1}), \quad (12)$$

где: p – давление в жидкости; α – постоянная; $T_k - T_{k_1}$ – изменение температуры.

Последние формулы касаются так называемого «третьего тела», которое рассматривают как следствие процессов течения в тонких слоях сорбционных пленок в зоне контакта тел трения. Понятно, что при росте температуры вязкость этих пленок падает, а при увеличении давления – растет. В случае скольжения зерна по фрикционных поверхностях сепаратора вследствие малой массы зерна изменение температуры поверхности стремится к нулю. Повышение температуры также нежелательно с точки зрения сохранности семян [7,10,11]. Что более принципиально, в таких условиях «третье тело» не должно образоваться. Поэтому, в последующих исследованиях группами параметров, соотносящихся к «третьему телу», следует пренебрегать.

Далее,

$$\alpha_{ef} = 2,5\alpha_z$$

где: α_{ef} – коэффициент гистерезисных потерь; α_z – коэффициент гистерезисных потерь при одноосном растяжения-сжатии.

Эти коэффициенты учитывают явление, которое характеризует потери энергии во время деформации при недостаточной упругости материала. Такие потери зависят от деформированных объемов, напряженного состояния в зоне контакта микронеровностей, которые моделируют в виде полусфер.

Таким образом, формула для нахождения механической составляющей коэффициента трения учитывает основные группы параметров: нагрузку (P, ν) через h ; физико-механическое состояние поверхностей трения (τ_0, β); обработку поверхности (R, R_{max}, ν, b, k_1); физико-механические параметры материалов (α_{ef}, E, μ); параметры, характеризующие состояние «третьего тела» ($\beta, \gamma, T_k - T_{k_1}$).

Учтем также влияние других параметров трибоспряжения на коэффициент внешнего трения. Для этого подставим функцию, которая прямо влияет на сближение поверхностей:

$$h = R \left[\frac{5p_c(1-\mu^2)\Delta^V}{\nu(\nu-1)k_1E} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}}, \quad (13)$$

в формулу для нахождения деформационной составляющей коэффициента трения. В результате этого получим:

$$f = \frac{2,4\tau_0}{P_c} \frac{1}{2\nu+1} \left[\frac{1-\mu^2}{\nu(\nu+1)k_1\Delta^2} \frac{1}{5} \frac{1}{2\nu} \frac{1}{E} \right] + \beta +$$

$$+ \frac{0,4\alpha_{ef}}{\nu^2-1} \left[\frac{5p_c\Delta^V(1-\mu^2)}{(k_1\nu)^{2\nu+2}(\nu-1)E} \right]. \quad (14)$$

Последняя формула используется также для расчета молекулярной составляющей силы трения при упругом ненасыщенном контакте. Для приближенных расчетов коэффициента внешнего трения в условиях упругого ненасыщенного контакта используют упрощенную формулу:

$$f = \frac{2,4\tau_0(1-\mu^2)^{0,8}}{P_c^{0,2}E^{0,8}\Delta^{0,4}} + \beta +$$

$$+ 0,24\alpha_{ef}\Delta^{0,4} \left[\frac{p_c(1-\mu^2)}{E} \right]^{0,2}. \quad (15)$$

Из последней формулы также видно, что изменение модуля упругости может существенно влиять на молекулярную и деформационную составляющие коэффициента трения.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в условиях внешнего трения при скольжении семенных смесей при их разделении на фрикционной поверхности сепараторов, имеем ненасыщенный упругий тип контакта.

2. Для такого типа контакта приведены основные соотношения, характеризующие процессы трения на уровне фактических площадей контакта.

3. Показано, что деформационная составляющая силы трения для семян по поверхностям сепаратора будет преобладать над молекулярной составляющей.

4. Выделены основные группы параметров, по которым следует проводить дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования трения семенных смесей.

- Zaika P.M. 2006.** Theory of agricultural machines. - Vol. 3, Chapter 7. Seed cleaning and separation. Kharkiv: Olo, 25-30.
- Kovalyshyn S.J. 2013.** Doslidzennya koeficientiv tertya nasinnya dribnonasinnykh silskohospodarskykh kultur / S. J. Kovalyshyn, V. O. Dadak // Visnyk Lvivskoho nacionalnoho ahrarnoho universytetu «Ahroinzenerni doslidzennya». № 17, 155-164.
- Dryncha V.M. 2010.** Osnovnyje konceptualnuje polozenia razrabotky tehnologii podhotovki semian / V. M. Dryncha, B. D. Cudendorziev, S. Pavlov. // Hranenie i pererabotka zerna. № 5 (131), 36-38.
- Bartneev I.M. 2013.** Sovershenstvovanie tehnologii i sredstv mehanizacii lesovostanovleniya / Drepaliuk M.V., Kizakov V.I. // M.: Flinta, 208.
- Yurova I.S.** Koefficienty trenia semian rastoropshi. / Shahov S.V., Zuravlov A.V., Kerimli R.V. // www.rusnauka.com/42_NIO_2014/Agricole/4_18_4757.doc.htm
- Isaev Yu.M. 2010.** Dvizenie semian po vintovoi linii. / Voronina M.V., Nazarova N.N. // Selskochozyaistvennue nauki. № 94, 75.
- Tehnologicheskie svoystva semian. [Mehanic-ua.ru / lektsii-po-mtgskhm / 178.](http://mechua.ru/lektsii-po-mtgskhm/178)
- Tarassenko A.P. 2009.** Zavisimost kachestva semyan pshenicy od frikcionnykh svoystv otdelnykh zernovok. / Myronenko D. // Vestnic Voronezhskoho hos. agro. un. Voronez. Vyp. 4(23), 20-23.
- Spravochnic po tribotekhnike. Tom 1. Teoreticheskie osnovy. Pod. red. M. Hebdy, A.V. Chichinadze. M. - Warszawa: Mashynostroenie – VKL, 1989, 398.
- Kovalyshyn S.J. 2012.** Ocinka ta vyjavlennia novykh oznak podilnosti dribnonasinnykh symishei silskohospodarskykh kultur / S. J. Kovalyshyn, V. O. Dadak, V.V. Sokolyk // Motrol: Motorization and power industry in agriculture. – Lublin: Commission of motorization and power industry in agriculture. – Vol. 14D, 95-103.
- Kovalyshyn S.J. 2015.** Geometrical and friction properties of perennial grasses and their weeds in view of an electro-separation method / S. J. Kovalyshyn, V. O. Dadak, V.V. Sokolyk, S. Grundas, M. Stasiak, J. Tys // International Agrophysics. – № 29, 185 – 191.
- Harko I. 2003.** Ochystka ta sortuvannia nasinnia ripaku / I. Harko, V. Mazur, H. Dutko // Ahrotehnika. – №4, 1-6.
- Ovsyannikova L.K. 2009.** Porivnialnyj analiz dribnonasinnykh kultur na osnovi statystychnykh harakterystyk jih rozmiriv / L. K. Ovsyannikova, S. S. Orlova, O. G. Sokolovska // Zbirn. nauk. prac. – Odesa NAHT. – 36, Tom 1, 121-126.
- Balasubramanian S. 2012.** Physical properties of coriander seeds at different moisture content / S. Balasubramanian, K.K. Singh, R. Kumar // Int. Agrophysics 26, 419-422.
- Kovalyshyn S.J. 2001.** Choice of parameters of perennial grass seed processing on an electrovibration separator : Doctoral dissertation : Lviv. – 236.
- Kovalyshyn S.J. 2013.** Use of the electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. / S.J. Kovalyshyn, O.P. Shvets, S. Grundas, and J. Tys. // Int. Agrophysics –T. 27, 491-494.
- Kovalyshyn S.J. 2014.** Pidvyshchennya efektyvnosti separuvannya nasinnya kormovykh trav. // S. J. Kovalyshyn, V.O. Dadak // Visnyk Harkivskoho nacionalnoho tehnicnoho universytetu im. Petra Vasylenka: Tehnicni systemy i tehnologii tvarynnyctva. – Vol. 144, 225-232.
- Zare D. 2013.** Physical properties of cumin and caraway seeds. / Zare D., Bakhshipour A., and Chen G. // International Agrophysics - 27(4), 231-244.
- Molenda M. 1995.** Friction of wheat grain. / M. Molenda, J. Horabik, J. Grochowicz // Acta Agrophysica, 4, 85
- Molenda M. 2000.** Friction of wheat on curred and smooth galvanized steel surfaces. / M. Molenda, S. A. Tompson, I. J. Ross // Journal of Agricultural Engineering Research. – № 77(2), 209-219.
- Some physical properties of ginkgo nuts and kernels [P.E. Ch'ng, M.H.R.O. Abdullah, E.J. Mathai, and N.A. Yunus] // International Agrophysics. – 2013. – 27(4), 485-489.
- Kovalyshyn S.J. 2014.** Puti usovershenstvovania posleuborochnoi podhotovki semian melkosemennykh kultur / S. J. Kovalyshyn, V. O. Dadak, V.V. Sokolyk // Motrol: Motorization and power industry in agriculture. – Lublin: Commission of motorization and power industry in agriculture. – Vol. 16D, 38-44.

INFLUENCE GROUP TRIBOLOGICAL
PARAMETERS ON THE FRICTION COEFFICIENT
OF THE FRICTION SURFACES SEEDS
SEPARATORS

Summary. Theoretical type of contact is defined in terms of seed mixtures friction during the separation of the separators. Based on known relations justified the choice groups of tribological parameters affecting the coefficients friction of seed mixtures of friction surface of the separator. Obtained roughness parameters specific to the study of friction at the level of the actual contact area. Substantiated their influence on the friction coefficient as the strain and the molecular components of the friction force. It is shown that the deformation component of friction force for seeds will prevail over the molecular component. Excluded impact groups of parameters describing the so-called "Third body". We also determined the next steps for further experimental and theoretical studies of seed mixtures friction.

Key words: seed mixture, separation, coefficient of friction, the actual contact area roughness of the tribological parameters unsaturated elastic contact.