

УДК (УДК) 625.731.08

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ АДГЕЗИИ И СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЛИПКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

## EXPERIMENTAL MODELING OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ADHESION AND FRICTION FORCES IN ASSESSING THE STICKINESS OF MATERIALS

Григорьев П.А., Сладкова Л.А.  
Grigorev P.A., Sladkova L.A.Российский университет транспорта (Москва, Россия)  
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** Налипание различных материалов на контактирующую поверхность является проблемной задачей в различных областях народного хозяйства, так как оно ведет к увеличению усилий копания, снижению производительности и, как следствие, увеличению экономических затрат. Для наземных транспортно-технологических комплексов налипание грунта характерно для поверхностей рабочих органов землеройных и сельскохозяйственных машин, транспортерных лент конвейеров, стенок смесительных установок и т.п. Процесс налипания изучен не в полной мере как с позиции проведения экспериментальных, так и теоретических исследований. Экспериментальное моделирование выявления и оценки липкости позволит раскрыть не только её физическую природу, но и найти определенные соотношения и зависимости при оценке сил трения грунта, что свидетельствует об их изменении в сторону увеличения при снижении скорости перемещения контактирующего тела. Причиной этого является наличие сил липкости между контактирующими поверхностями. Полученные результаты достигнуты на основе математического аппарата и энергетической природы, а также моделирования процесса изменения сил трения в зависимости от адгезионных свойств поверхности.

**Ключевые слова:** моделирование, эксперимент, стенд, липкость, налипание, адгезия, сила трения грунта.

**Дата получения статьи:** 21.11.2023  
**Дата принятия к публикации:** 19.12.2023  
**Дата публикации:** 25.12.2023

**Сведения об авторах:**

**Григорьев Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»,  
e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-5409-6250

**Сладкова Любовь Александровна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»,  
e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

**Abstract.** Sticking of various materials on contacting surfaces is a problematic task in various areas of the national economy, as it leads to an increase in digging efforts, a decrease in productivity and, as a result, an increase in economic costs. For ground-based transport and technological complexes, soil sticking is characteristic of the surfaces of the working bodies of earthmoving and agricultural machines, conveyor belts, walls of mixing plants, etc. The process of sticking has not been fully studied, both from the standpoint of experimental and theoretical studies. Experimental modeling of the detection and evaluation of stickiness will reveal not only its physical nature, but also find certain relationships and dependencies in the evaluation of the friction forces of the soil, which indicates their change in the direction of increase with a decrease in the speed of movement of the contacting body. The reason for this is the presence of sticky forces between the contacting surfaces. The results obtained were achieved on the basis of mathematical apparatus and energy efficiency, as well as modeling the process of changing friction forces depending on the adhesive properties of the surface.

**Keywords:** modeling, experiment, stand, stickiness, sticking, adhesion, soil friction force.

**Date of manuscript reception:** 21.11.2023  
**Date of acceptance for publication:** 19.12.2023  
**Date of publication:** 25.12.2023

**Authors' information:**

**Pavel A. Grigorev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Ground transportation and technological means at Russian University of Transport,  
e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-5409-6250

**Liubov A. Sladkova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Ground transportation and technological means at Russian University of Transport, e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

## 1. Введение

В процессе разработки связных грунтов рабочими органами землеройных и сельскохозяйственных машин происходит значительное налипание, что приводит к снижению производительности машин, а также к увеличению удельной энергоемкости процесса [1 - 3].

Рассмотрим, каким образом определяются показатели липкости для связных сред, так, например, при определении липкости препрегов используются методы:

- катящегося ролика, где значение пройденного роликом пути позволяет оценить сравнительную липкость материала [4];
- определения липкости при помощи установки на базе разрывной машины, где по результатам записи усилий протягивания ленты определяют липкость [5].

При рассмотрении взаимодействия грунта с рабочими органами землеройных машин второй метод использовать невозможно, в связи с тем, что грунтовая стружка не обладает достаточной связностью. Для определения адгезионных свойств грунтовой стружки при перемещении по горизонтальной поверхности рабочего органа землеройной машины [6, 7] целесообразно использовать тела качения, в связи с тем, что, в момент касания с поверхностью в результате воздействия на нее с усилием, определяемым массой тела, мы можем выделить и оценить нормальную и тангенциальную составляющие адгезионных сил. Например, для оценки тангенциальной составляющей необходимо осуществить прямолинейное перемещение тела по поверхности [8].

Для обработки результатов планируемых экспериментальных исследований целесообразно использовать методы аппроксимации.

## 2. Постановка и планирование экспериментальных исследований

Моделирование эксперимента процессов трения и адгезии отличается:

- простотой исполнения;

- возможностью многократного повторения опытов;

- получением реальных результатов;
- оценкой погрешности исследований

Проведенный эксперимент позволит выявить физический смысл процессов трения и адгезии.

Для получения заявленного результата предлагается моделирование процесса осуществлять при скатывании цилиндров различной массы (радиуса  $r$ ) по наклонной плоскости (желобу) с изменяемым углом наклона  $\alpha$ .

Для проведения экспериментальных исследований был разработан стенд (рис. 1), представляющий собой желоб, стоящий из двух частей (наклонной и горизонтальной). Наклонная часть соединена с горизонтальной частью желоба шарнирно для возможности изменения угла наклона.

Станина, на которую опирается наклонная часть желоба, имеет шкалу с метками с помощью которых фиксируется положение верхнего конца наклонного желоба и уровень, с которого будет скатываться цилиндр при любых условиях эксперимента. В желобе, ближе к его верхней части, выполнен фиксатор, который позволяет обеспечить неизменную относительно продольной оси желоба установку цилиндра, продольная ось которого должна быть расположена перпендикулярно оси желоба, таким образом должно осуществляться перемещение цилиндра по желобу без перекосов.

Поверхность горизонтальной части желоба для оценки адгезионных свойств материалов может иметь различное покрытие. Предлагаемая установка позволяет осуществить проведение эксперимента для установления величины выбега  $l$  цилиндра в зависимости от угла наклона желоба  $\alpha$  и радиуса цилиндра  $r$ . В соответствии со схемой цилиндр массой  $m$  и с радиусом  $r$  катится без скольжения по наклонной плоскости длиной  $S$ .

Работа силы тяжести  $A$  при этом перемещении затрачивается на сообщение цилиндру поступательного и вращательного движения и будет равна:

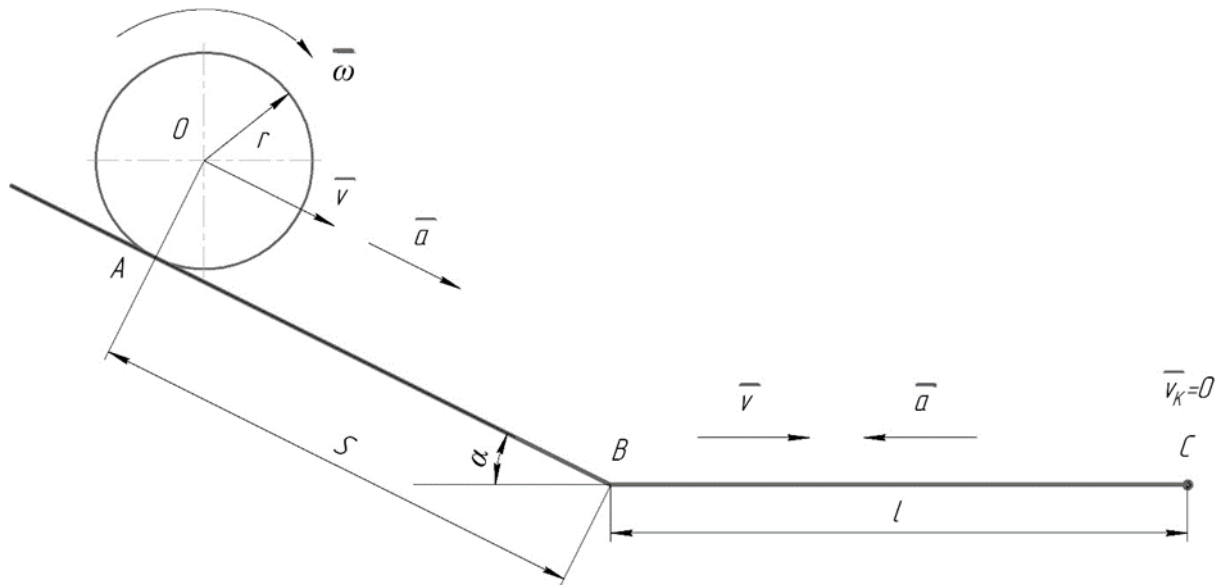


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

$$A = mgS \sin \alpha. \quad (1)$$

Учитывая, что в точке  $A$  скорость цилиндра равна нулю, то в точке  $B$  величина его кинетической энергии, полученной в результате поступательного движения будет равна:

$$W_1 = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где  $v$  – линейная скорость перемещения цилиндра в точке  $B$ , м/с.

Энергия вращательного движения цилиндра (вокруг точки  $O$ ) определяется по зависимости:

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{J\omega^2}{2} = \frac{1}{2}mr^2 \cdot \frac{v^2}{2r^2} = \\ &= \frac{1}{4}mv^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $J = \frac{1}{2}mr^2$  – момент инерции цилиндра;  $\omega = v/r$  – угловая скорость вращения цилиндра,  $c^{-1}$ .

Уравнение сохранения энергии цилиндра на участке  $AB$  представим в виде [9]:

$$A = W_1 + W_2 \quad (4)$$

или

$$mgS \sin \alpha = \frac{3mv^2}{4}.$$

Откуда:

$$v^2 = \frac{4gS \sin \alpha}{3}. \quad (5)$$

Следовательно, кинетическая энергия цилиндра в точке  $B$ , которая расходуется при переходе на горизонтальную часть желоба на

совершение работы  $A_{\text{кач}}$  при перемещении цилиндра на расстояние  $l$ , будет равна:

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{2mgS \sin \alpha}{3}. \quad (6)$$

В точке  $C$  цилиндр останавливается, поэтому кинетическая энергия его полностью расходуется на совершение работы качения, т.е.:

$$W = A_{\text{кач}}$$

или

$$\frac{2mgS \sin \alpha}{3} = -\frac{k}{r}mgl. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что длину выбега можно оценить по зависимости:

$$l = \frac{2rS \sin \alpha}{3k}. \quad (8)$$

Анализ зависимости (8) показывает, что с увеличением длины пути скатывания, угла наклона  $\alpha$  и радиуса цилиндра (массы), его выбег увеличивается, а при увеличении коэффициента сопротивления качению – уменьшается. Здесь сопротивление качению свидетельствует о тангенциальной составляющей силы адгезии.

### 3. Обработка и оценка результатов экспериментальных исследований

Для подтверждения результатов теоретических исследований проводились эксперименты по оценке выбега цилиндра при угле

наклона желоба от 10 до 70°, при этом шаг изменения угла составлял 10°.

На первом этапе определялось необходимое число параллельных опытов при доверительной вероятности, равной 0,95 их воспроизводимости.

Для этого в соответствии с рекомендациями [10] было проведено двадцать скатываний цилиндра радиуса 7,15 мм, по желобу, имеющему наклон  $\alpha$ , равный 30°.

Выбег цилиндра при этом был равен 690, 725, 740, 735, 711, 722, 733, 724, 725, 678, 734, 735, 688, 723, 735, 755, 768, 768, 716 мм.

Результаты пробного эксперимента показали, что для получения достоверных результатов достаточное число параллельных опытов может быть равно 3 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты эксперимента по выбегу цилиндров на горизонтальном участке

Радиус цилиндра $r$ , м					
0,00275	0,0035	0,00475	0,00635	0,00715	0,0095
$\alpha = 10^\circ$					
0,181	0,194	0,232	0,296	0,290	0,392
0,195	0,210	0,251	,319	0,305	0,398
0,194	0,211	0,252	0,326	0,315	0,401
$\alpha = 20^\circ$					
0,327	0,378	0,435	0,538	0,577	0,741
0,336	0,415	0,453	0,555	0,616	0,768
0,330	0,383	0,468	0,578	0,629	0,777
$\alpha = 30^\circ$					
0,382	0,460	0,551	0,665	0,704	0,901
0,400	0,507	0,569	0,673	0,647	0,857
0,383	0,445	0,578	0,712	0,711	0,872
$\alpha = 40^\circ$					
0,382	0,475	0,517	0,618	0,690	0,903
0,394	0,493	0,555	0,651	0,734	0,915
0,393	0,460	0,519	0,645	0,760	0,885
$\alpha = 50^\circ$					
0,359	0,370	0,532	0,619	0,615	0,800
0,363	0,420	0,464	0,646	0,625	0,845
0,395	0,377	0,470	0,643	0,643	0,813
$\alpha = 60^\circ$					
0,321	0,345	0,304	0,415	0,468	0,550
0,290	0,346	0,315	0,409	0,459	0,530
0,317	0,380	0,308	0,425	0,469	0,607
$\alpha = 70^\circ$					
0,098	0,120	0,188	0,254	0,317	0,335
0,135	0,137	0,203	0,211	0,308	0,347
0,133	0,188	0,162	0,235	0,280	0,332

Анализ результатов в табл. 1 показывает, что увеличение выбега  $l$  цилиндра независимо от его массы увеличивается при увеличении угла  $\alpha$  наклона желоба до значений  $\alpha = 40^\circ$ . В дальнейшем выбег снижается. Причиной этого явления, на наш взгляд, яв-

ляется сделанной допущение об отсутствии проскальзывания между цилиндром и поверхностью. Таким образом, делая допущение об отсутствии проскальзывания, мы исключаем наличие сил адгезии между телами. Очевидно, что скорость перемещения тел

друг по другу является одним из определяющих факторов тангенциальной составляющей адгезионных сил.

Рассмотрим скатывание цилиндра с учетом сил проскальзывания.

Сила трения  $F$  между поверхностью цилиндра и плоскостью можно определить по зависимости:

$$F = \mu N, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  $N$  – сила нормального давления со стороны желоба на цилиндр,  $N$ .

Причем условие скатывания цилиндра будет возможно при условии:

$$F \leq \mu N.$$

Фактическое значение силы трения  $F$  может быть определено из условия равенства нулю (равновесия) сил, вызывающих вращательной и поступательное движение цилиндра по желобу. Таким образом:

$$J\varepsilon = Fr; \quad (10)$$

$$ma = P \sin \alpha - F, \quad (11)$$

где  $J$  – момент инерции цилиндра,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\varepsilon$  – угловое ускорение цилиндра,  $\text{с}^{-2}$ ;  $a = \varepsilon r$  – ускорение перемещения центра цилиндра без скольжения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

В результате получим

$$F = \frac{ma}{2}. \quad (12)$$

Подставив (12) в (11), определим ускорение перемещения цилиндра:

$$a = \frac{2g \sin \alpha}{3}. \quad (13)$$

С учетом выражения (13) получим

$$F = \frac{1}{3} mg \sin \alpha. \quad (14)$$

Полученное выражение позволяет получить величину силы, позволяющей перемещаться цилиндру без скольжения. Другими словами, по этой зависимости можно оценить тангенциальную составляющую силы адгезии и установить ее связь с силой трения:

$$\frac{1}{3} mg \sin \alpha \leq \mu P \cos \alpha. \quad (15)$$

Или для определения сил адгезии необходимо, чтобы коэффициент трения удовлетворял условию:

$$\mu \geq \frac{1}{3} \operatorname{tg} \alpha.$$

Если коэффициент трения будет меньше этого значения, то цилиндр будет катиться с проскальзыванием, что приведет к искажению результатов экспериментальных исследований. Другими словами, цилиндр, достигнув точки  $B$  (рис. 1) не будет плавно переходить на горизонтальную поверхность, а нанесет по ней удар, ведущий к его реверсу, то есть часть кинетической энергии цилиндра будет израсходована на удар [11], а работа качения  $A_{\text{кач}}$  уменьшится, что приведет к снижению выбега цилиндра.

Анализ табл. 1 свидетельствует о плавном снижении выбега цилиндра справа и слева от точки перегиба при  $\alpha = 40^\circ$ . Это свидетельствует о возможности влияния других неучтенных факторов, возникающих в момент перехода цилиндра от наклонной плоскости к горизонтальной. Расчетная схема этого взаимодействия показана на рис. 2.

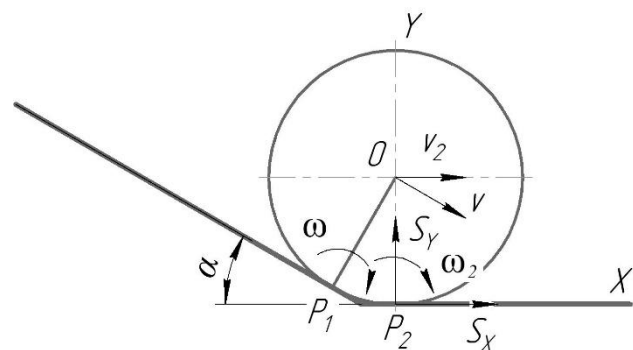


Рис. 2. Расчетная схема качения цилиндра в месте перехода с наклонной на горизонтальную поверхности

При движении цилиндра без скольжения вместе с переходом наклонной плоскости в горизонтальную, при любом угле наклона  $\alpha > 0$ , будет происходить удар, так как мгновенный центр скоростей из точки  $P_1$  практически мгновенно перемещается в точку  $P_2$ . В результате этого движения изменится перемещение центра масс цилиндра.

Определим угловую скорость  $\omega_2$  после удара и импульс ударных сил  $I$ . Для этого составим уравнение импульса сил  $L_{zi}$  на основании теоремы об изменении кинетического момента механической системы (рис. 2) приняв за ось моментов ось  $OZ$ , перпенди-

кулярную плоскости, проходящую через точку  $P_2$  [9]:

$$L_{z_1} - L_{z_2} = \sum M_z(I_i^e). \quad (16)$$

Ударный импульс пересекает ось  $OZ$ , поэтому  $\sum M_z(I_i^e) = 0$ . При ударе кинетический момент системы остается постоянным, т.е. сохраняется закон сохранения импульса  $L_{z_1} = L_{z_2}$ .

Кинетический момент цилиндра относительно оси  $OZ$  в начале удара запишем в виде

$$L_{z_1} = -mvr \cos \alpha - J\omega$$

или

$$L_{z_1} = -mr^2\omega \left( \cos \alpha + \frac{1}{2} \right). \quad (17)$$

Кинетический момент инерции цилиндра относительно оси  $OZ$  в конце удара будет равен

$$\begin{aligned} L_{z_2} &= -mv_2r - J\omega_2 = \\ &= -\frac{3}{2}mr^2\omega_2, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $v_2 = \omega_2r$  – скорость центра масс цилиндра после удара.

Так как  $L_{z_1} = L_{z_2}$ , то угловую скорость  $\omega_2$  определяют по зависимости:

$$\omega_2 = \frac{\omega(2 \cos \alpha + 1)}{3}. \quad (19)$$

График изменения угловой скорости  $\omega_2$  от угла  $\alpha$  показан на рис 3.

Определим импульс ударных сил, воспроизводимый цилиндром со стороны горизонтальной поверхности, на основании теоремы об изменении количества движения системы при ударе.

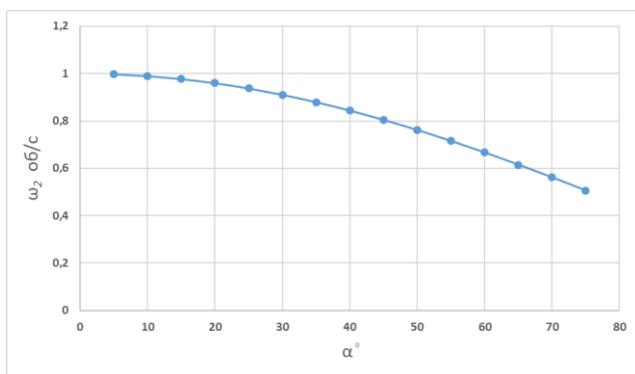


Рис. 3. График изменения угловой скорости  $\omega_2$  от угла  $\alpha$

В проекциях на оси  $X$  и  $Y$  уравнение, характеризующее импульс ударных сил, имеет вид:

$$\begin{cases} mv - mv_2 \cos \alpha = I_x \\ 0 - (-mv_2 \sin \alpha) = I_y \end{cases}$$

После преобразования, получим:

$$\begin{cases} I_x = mr\omega \frac{2 - 2 \cos \alpha}{3} \\ I_y = mr\omega \sin \alpha \end{cases}. \quad (20)$$

Тогда полный импульс ударных сил в точке  $P_2$  будет равен:

$$I = mr\omega \cdot \frac{\sqrt{9 \sin^2 \alpha - 4 \cos^2 \alpha + 8 \cos \alpha + 4}}{3}. \quad (21)$$

Графическая интерпретация выражения (21) показана на рис. 4.

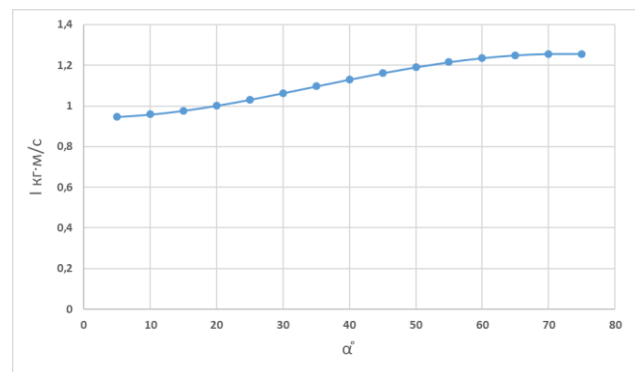


Рис. 4. Изменение импульса сил от угла  $\alpha$

Расчет коэффициента трения, используемых в эксперименте цилиндров, на основании зависимости  $\mu \geq \frac{1}{3} \operatorname{tg} \alpha$  при угле  $\alpha = 40^\circ$  позволил установить, что среднестатистическое его значение равно:

$$\mu = 0,237.$$

При этом коэффициент трения металла по металлу равен  $0,15 \dots 0,25$ .

#### 4. Формирование алгоритма проведения экспериментальных исследований

В результате проведенных исследований предлагается алгоритм проведения эксперимента:

1. Определяется коэффициент сопротивления качению  $k$  для цилиндров различного радиуса по углу наклона наклонной части плоскости. Для этого цилиндр необходимо разметить на наклонном участке плос-

кости, которую необходимо плавно отклонять от горизонтального положения. В момент начала скатывания цилиндра с поверхности фиксируется угол  $\alpha$ .

2. По результатам 12 повторений при идентичных условиях определяются значения предельного угла  $\alpha$  начала скатывания цилиндра. Таким образом будет проведена оценка коэффициента трения покоя при скатывании цилиндра. Примеры результатов эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Значения коэффициентов трения качения  $k$  цилиндра

Радиус цилиндра, м	Угол $\alpha$ , град	$\text{tg } \alpha$	$k$
0,00275	8,8	0,155	0,043
0,0035	7,7	0,135	0,047
0,00475	5,8	0,102	0,048
0,00635	5,2	0,091	0,058
0,00715	4,2	0,073	0,052
0,00950	3,3	0,058	0,055

При этом коэффициент трения качения определяется по зависимости:

$$k = r \text{tg } \alpha. \quad (22)$$

Из табл. 2 видно, что разброс значений коэффициента трения качения  $k$  равен почти 35%. Этот результат свидетельствует о возможности применения теории нечетких множеств к расчету выбега цилиндра и по-

строению соответствующего уравнения регрессии.

С учетом коэффициента трения качения цилиндра суммарная сила сопротивления его качения будет равна:

$$F = \frac{1}{3} m g \left( \sin \alpha + \frac{k}{r} \cos \alpha \right). \quad (23)$$

Сопоставляя полученное выражение с зависимостью (14) видно, что отличие заключается во втором слагаемом. Так как при проведении эксперимента рассматривалась пара «металл-металл», то цифровые значения коэффициента  $k$  пренебрежимо малы и его влияние на конечный результат незначительно.

#### 4. Заключение

В результате проведения экспериментальных исследований предлагается методика оценки влияния адгезионных свойств различных сред на величину сил трения. Используя поверхности с различной степенью адгезии при качении по ним цилиндрического тела возможно установить степень её влияния на скорость перемещения частиц разрабатываемой среды. Это позволило получить наиболее полное представление о физике процесса разработки различных связных сред, как модели взаимосвязи адгезии и сил трения с учетом их липкости.

#### Список литературы

1. Дырда Н.П., Каслин Н.Д. Экспериментальные исследования налипания и намерзания грунта на рабочий орган роторного экскаватора // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2005. № 29. С. 153-155.

2. Побегайло П.А., Папич Л., Гадолина И.В., Силова Т.В. Защита горнорудного оборудования от износа и налипания горных пород: Современное состояние вопроса // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Научные труды V-й Международной научной конференции, Москва, 08-09 ноября 2017 года. Москва: Издательский дом "Спектр", 2017. С. 217-219.

#### References

1. Dyrda N.P., Kaslin N.D. Eksperimentalnye issledovaniya nalipaniya i namerzaniya grunta na rabochij organ rotornogo ekskavatora. *Vestnik Harkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2005, No 29, pp. 153-155. (In Russian)

2. Pobegajlo P.A., Papich L., Gadolina I.V., Silova T.V. Zashchita gornorudnogo oborudovaniya ot iznosa i nalipaniya gornyh porod: Sovremennoe sostoyanie voprosa . In: *Fundamentalnye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: Nauchnye trudy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Moscow, 08-09 noyabrya 2017 goda. Moscow, Izdatelskiy dom "Spektr"*,

3. Кузнецов В.Г., Кочетов Е.В., Россихин Г.В., Игнатов С.М. Повышение производительности роторных комплексов и драглайнов за счёт уменьшения налипания грунта. Обзор. Москва: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. 36 с.
4. Орлов Е.В., Гусев Ю.А., Хрульков А.В., Коротков И.А. Сравнительный анализ методов определения липкости препрега // Труды ВИАМ. 2016. № 7(43). С. 9. DOI 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9.
5. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental characterisation and investigate on of prepreg tack // In Proceedings of ICCM-18. Edinburgh. 2009. pp. 1-11.
6. Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Модель изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтовым массивом // Трение и износ. 2022. Т. 43, № 4. С. 397-404. DOI 10.32864/0202-4977-2022-43-4-397-404.
7. Сладкова Л.А., Григорьев П.А. Физико-математическое моделирование процессов трения, адгезии и когезии в проблеме липкости грунта // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 339-347.
8. Федоров Д.А. Перемещения, деформации, напряжения. Измерения и расчеты: тексты лекций. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т., 2018. 165 с.
9. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. Москва: Высш. шк., 1986. 416 с.
10. Сладкова, Л.А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин. Москва: МГУПС (МИИТ), 2016. 275 с.
11. Григорьев А.Ю., Григорьев К.А., Малявко Д.П. Соударение тел. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. 43 с.
- 2017, pp. 217-219. (In Russian)
3. Kuznecov V.G., Kochetov E.V., Rossihin G.V., Ignatov S.M. *Povyshenie proizvoditelnosti rotornykh kompleksov i draglaynov za schyot umensheniya nalipaniya grunta. Obzor* [Increasing the productivity of rotor complexes and draglines by reducing soil sticking. Review]. Moscow, CNIITEItyazhmash, 1991. 36 p. (In Russian)
4. Orlov E.V., Gusev Yu.A., Hrulkov A.V., Korotkov I.A. Comparative analysis of stickiness determination methods of prepreg. *Trudy VIAM*, 2016, No. 7(43), pp. 9. DOI 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9. (In Russian)
5. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental characterisation and investigate on of prepreg tack. In: Proceedings of ICCM-18. Edinburgh, 2009, pp. 1-11.
6. Grigorev P.A., Sladkova L.A. The model of wear of the working bodies of earthmoving machines in interaction with the soil mass. *Trenie i iznos*, 2022, Vol. 43, No 4, pp. 397-404. DOI 10.32864/0202-4977-2022-43-4-397-404. (In Russian)
7. Sladkova L.A., Grigorev P.A. Physical-mathematical modeling of friction, adhesion and cohesion process in the problem of soil stickiness. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.4, pp. 339-347. (In Russian)
8. Fedorov D.A. *Peremeshcheniya, deformatsii, napryazheniya. Izmereniya i raschety* [Displacement, deformation, stress. Measurements and calculations]. Sankt-Peterburg: Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy un-iversitet., 2018. 165 p. (In Russian)
9. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki* [A short course in theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 416 p.
10. Sladkova, L.A. *Issledovaniya i ispytaniya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin*: [Research and testing of ground transport and technological machines]. Moscow, MGUPS, 2016. 275 p. (In Russian)
11. Grigorev A.Yu., Grigorev K.A., Malyavko D.P. *Soudarenie tel* [Collision of bodies]. Sankt-Peterburg: Universitet ITMO, 2015. 43 p. (In Russian)