

Методика функционального алгоритмирования оценки износа протектора колёсного движителя в условиях склонного земледелия

Е.М. Асманкин, д.т.н., профессор, Ю.А. Ушаков, д.т.н., профессор, В.С. Стеновский, к.т.н., С.В. Тарасова, к.т.н., В.А. Шахов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ; С.А. Соловьёв, чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, ФГБНУ ГОСНИТИ

В настоящее время существуют методические, математические и процедурные наработки, позволяющие значительно снизить затраты на проведение лабораторных и производственных экспериментов, основанных на использовании дорогостоящих опытных образцов испытуемой техники и значительных капиталовложений в комплектование технического обеспечения экспериментов [1]. Оценивая уровень релевантности при реализации поисковых и исследовательских процедур отмечаем, что недостаточно использования какой-то одной из существующих методик для проведения анализа влияния углов увода колёс на интенсивность износа шин машины при движении её по наклонной опорной поверхности.

Цель исследования – формирование метода комплексного исследования влияния углов увода

колёс на износ шин, который позволит создать информационную лабораторную базу данных экспериментальных процедур, тем самым сократить затраты денежных средств.

Материал и методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования процесса качения колеса с пневматической шиной описаны в работах как отечественных, так и зарубежных учёных [1, 2]. Теория качения эластичного колеса с явлением бокового увода тракторных шин изложена в трудах Е.А. Чудакова, В.Е. Красильникова, П.А. Кудинова, И.М. Лутаева, О.В. Маргвелашвили, В.А. Мещерякова, А.Ф. Полетаева, А.С. Шарара, В.Г. Ярового, В. Schlippe, W. Bergman, R. Dietrich и др. [2–4]. Однако в научных изысканиях не акцентировалось внимание в плане влияния бокового увода на интенсивность изнашивания шин. Наиболее фундаментально данное явление было описано В.П. Бойковым. В результате проведённого им исследования была получена эмпирическая зависимость, определяющая интенсивность изнашивания шин пневматических колёс,

взаимодействующих с горизонтальной опорной поверхностью [5]:

$$I = \frac{K_u p_{cp} \mu_{mp} a \delta_i}{2\pi r_k}, \quad (1)$$

где K_u – коэффициент истирающей способности грунта;

P_{cp} – среднее номинальное давление в контакте, МПа;

μ_{mp} – коэффициент трения резины о грунт;

δ_i – угол увода i -го колеса, рад;

r_k – радиус качения колеса, м;

a – длина пятна контакта колеса, м.

Эта методика имеет ограниченный исследовательский диапазон. Необходимо установить дополнительные теоретические, формальные связи и математические выражения её эмпирических составляющих. Установлено, что деформированное пятно контакта колеса оказывает значительное влияние на управляемость трактора [5]. Площадь пятна контакта тракторных шин, непосредственно связанную с нормальной деформацией, определяют по эллиптическому отпечатку контакта шины. Большая полуось эллипса является половинной длиной пятна контакта шины [5]:

$$a = 2\sqrt{r_{cm}^2 - r_c^2}, \quad (2)$$

где r_{cm} – статический радиус колеса, м;

r_c – свободный радиус колеса, м.

В ОАО «Научно-исследовательский тракторный институт» внесены коррективы и разработаны достоверные способы определения конструктивно-режимных параметров движителя, в том числе длины пятна контакта. В связи с этим в уравнение (2) внесён уточняющий коэффициент, находящийся в пределах от 0,7 до 0,75 [5, 6]:

$$a = (0,7...0,75)2\sqrt{r_{cm}^2 - r_c^2}. \quad (3)$$

В полученном выражении (3) исследовательский интерес представляет разность между свободным и статическим радиусом, характеризующая нормальный прогиб шины h_z [7]. Таким образом, выражение длины контакта шины можно преобразовать в формулу, удобную для дальнейших математических процедур определения износа шин:

$$a = 2(0,7...0,75)\sqrt{h_z^2} = (1,4...1,5)h_z, \quad (4)$$

где h_z – нормальный прогиб шин колеса, м.

Для нахождения нормального прогиба существует ряд эмпирических выражений [5, 7]. Достоверной, по мнению ведущих специалистов, является методика, предложенная Р. Хедекелем. Она учитывает как внутришинное давление, так и угол наклона опорной поверхности (рис. 1):

$$h_z = \frac{G \cos \alpha}{P_{p\omega} \sqrt{Db_k}}, \quad (5)$$

где b_k – ширина колеса, м;

D – диаметр колеса, м.

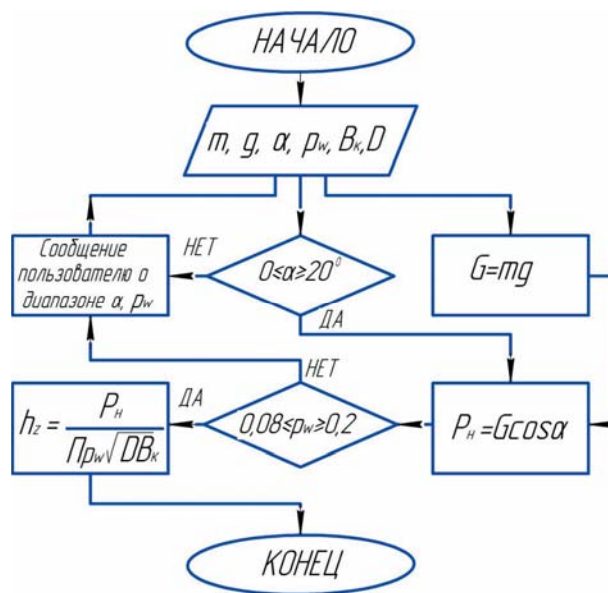


Рис. 1 – Алгоритм расчёта нормального прогиба пневматических шин

Как предусмотрено в методике В.П. Бойкова, при работе колеса на наклонной опорной поверхности износ шины имеет специфический характер, связанный с влиянием углов увода на деформацию шины. Однако автор не установил математическую зависимость определения угла увода, а обозначил её как эмпирический параметр, который невозможно выразить без проведения реальных лабораторных и производственных экспериментов. В связи с этим затраты на проведение научно-технических исследований увеличиваются в сегменте создания физического опытного образца. Фактически речь идёт о целесообразности аналитического подхода к решению вопроса формирования массива искомых значений вместо дорогостоящих измерительных процедур. Таким образом, способ расчёта угла увода колёс с помощью отношения $G \sin \alpha$ к выражению $(C_1 + C_2 p_{\omega 1,2} G \cos \alpha)$ представляет особый интерес для теоретизации интенсивности износа шин при движении машины по наклонной опорной поверхности.

Результаты исследования. В процессе исследования пришли к необходимости определения величины среднего номинального давления в пятне контакта шины с опорной поверхностью P_{cp} , которая выражается отношением составляющей нормальной силы N и площади пятна контакта $F_{нк}$.

Значения составляющих нормальной силы отличаются в зависимости от расположения колёс относительно продольной и поперечной осей трактора (рис. 2). Составляющая нормальной силы правого переднего колеса, правого заднего колеса, левого переднего колеса, левого заднего колеса [8] соответственно равны, H :

$$N_{нк} = 0,4G \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{h}{B} \sin \alpha \right);$$

$$\begin{aligned} N_{лзк} &= 0,6G\left(\frac{\cos\alpha}{2} + \frac{h}{B}\sin\alpha\right); \\ N_{лнк} &= 0,4G\left(\frac{\cos\alpha}{2} - \frac{h}{B}\sin\alpha\right); \\ N_{зк} &= 0,6G\left(\frac{\cos\alpha}{2} - \frac{h}{B}\sin\alpha\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где h – высота центра тяжести трактора, м;
 B – ширина колеи колёс, м.

Усилие на крюке $P_{кр}$ перераспределит нагрузку на колёсах (рис. 3). Передние колёса будут разгружены, а задние – дополнительно нагружены. Величины этих дополнительных нагрузок определяются из уравнений моментов всех сил относительно мгновенного центра скоростей задних и передних колёс. Допустимо рассмотреть силовую нагрузку в продольной плоскости. Суммарная реакция от опорной поверхности на передние и задние колёса изменится на величины $-\Delta N_n$ и ΔN_z соответственно.

$$\begin{cases} \text{mom}_z \bar{F}_i = 0 \\ \text{mom}_n \bar{F}_i = 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta N_n l + P_{кр} h_{кр} \sin\tau + P_{кр} \cos\tau(m - 0,4l) = 0 \\ \Delta N_z l + P_{кр} h_{кр} \sin\tau + P_{кр} \cos\tau(m + 0,6l) = 0 \end{cases}$$

откуда

$$\begin{cases} \Delta N_n = -\frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m - 0,4l))}{l} \\ \Delta N_z = \frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m + 0,6l))}{l} \end{cases} \quad (8)$$

Одно переднее колесо будет разгружено на величину $\Delta N_n/2$. Одно заднее колесо будет дополнительно нагружено силой величиной $\Delta N_z/2$.

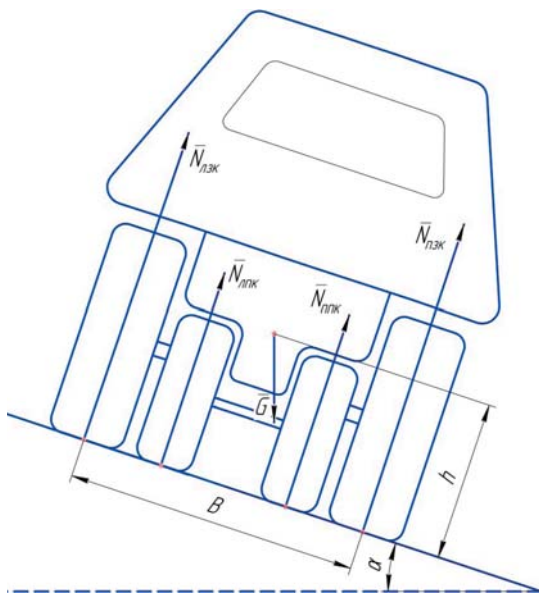


Рис. 2 – Схема к определению составляющих реакций наклонной опорной поверхности на колёса

Таким образом, получим уравнения составляющих нормальной силы с учётом крюковой нагрузки:
 – составляющая нормальной силы правого переднего колеса, H :

$$N_{лнк} = 0,4G\left(\frac{\cos\alpha}{2} + \frac{h}{B}\sin\alpha\right) - \frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m - 0,4l))}{2l}; \quad (9)$$

– составляющая нормальной силы правого заднего колеса, H :

$$N_{лзк} = 0,6G\left(\frac{\cos\alpha}{2} + \frac{h}{B}\sin\alpha\right) + \frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m + 0,6l))}{2l}; \quad (10)$$

– составляющая нормальной силы левого переднего колеса, H :

$$N_{лнк} = 0,4G\left(\frac{\cos\alpha}{2} - \frac{h}{B}\sin\alpha\right) - \frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m - 0,4l))}{2l}; \quad (11)$$

– составляющая нормальной силы левого заднего колеса, H :

$$N_{лзк} = 0,6G\left(\frac{\cos\alpha}{2} - \frac{h}{B}\sin\alpha\right) + \frac{P_{кр}(h_{кр} \sin\tau + \cos\tau(m + 0,6l))}{2l}. \quad (12)$$

Площадь пятна контакта $F_{нк}$ выражается следующим образом, м²:

$$F_{нк} = \frac{\pi b_{нк} a}{4}, \quad (13)$$

где $b_{нк}$ – ширина пятна контакта колеса, м;

Необходимые для определения интенсивности износа в методике В.П. Бойкова такие параметры, как коэффициент истирающей способности грунта K_u , коэффициент трения резины о грунт $\mu_{мр}$, радиус качения колеса r_k , являются справочными данными для каждой конкретной модели шины [5, 9]. Можно утверждать, что интенсивность изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия и наличия крюковой нагрузки описывается выражением:

$$I = \frac{2K_u N_{и} \mu_{мр} G \sin\alpha}{r_k b_{нк} \pi^2 (C_1 + C_2 \rho_{\omega} G \cos\alpha)}. \quad (14)$$

Полученная методика позволила проанализировать величину силового взаимодействия шины с опорной поверхностью при её деформации и проскальзывании в пятне контакта, что в условиях бокового увода является характеристикой интенсивности износа. Учитывая возможность численного решения анализируемой системы уравнений, дальнейшая формализация поисковых процедур проведена в формате математического эксперимента с учётом его машинной интерпретации в программе MathCAD 14.

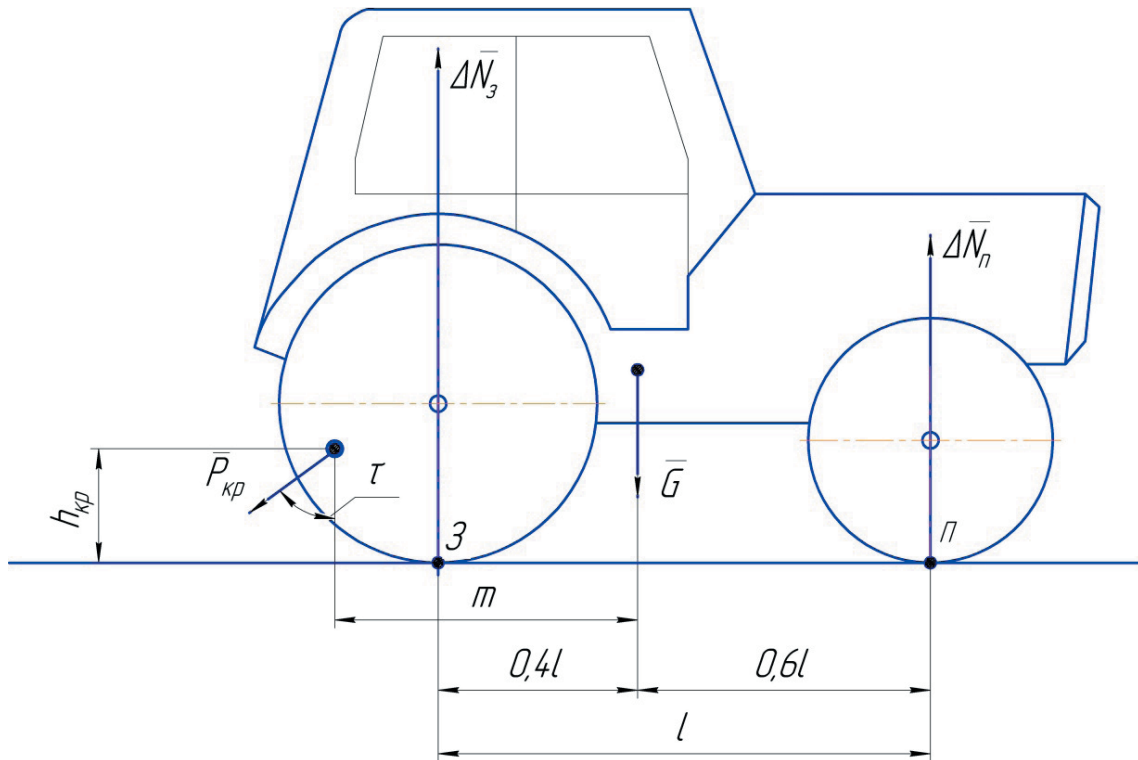


Рис. 3 – Схема к определению составляющих реакций наклонной опорной поверхности на колёса с учётом крюкового усилия:

$P_{кр}$ – крюковая сила, Н; $h_{кр}$ – высота приложения крюкового усилия; m – расстояние между крюковым усилием и центром тяжести трактора; l – расстояние между осями передних и задних колёс; З, П – точки взаимодействия соответственно заднего и переднего колёс с опорной поверхностью; \downarrow – градиент склона; τ – угол наклона крюкового усилия, рад.

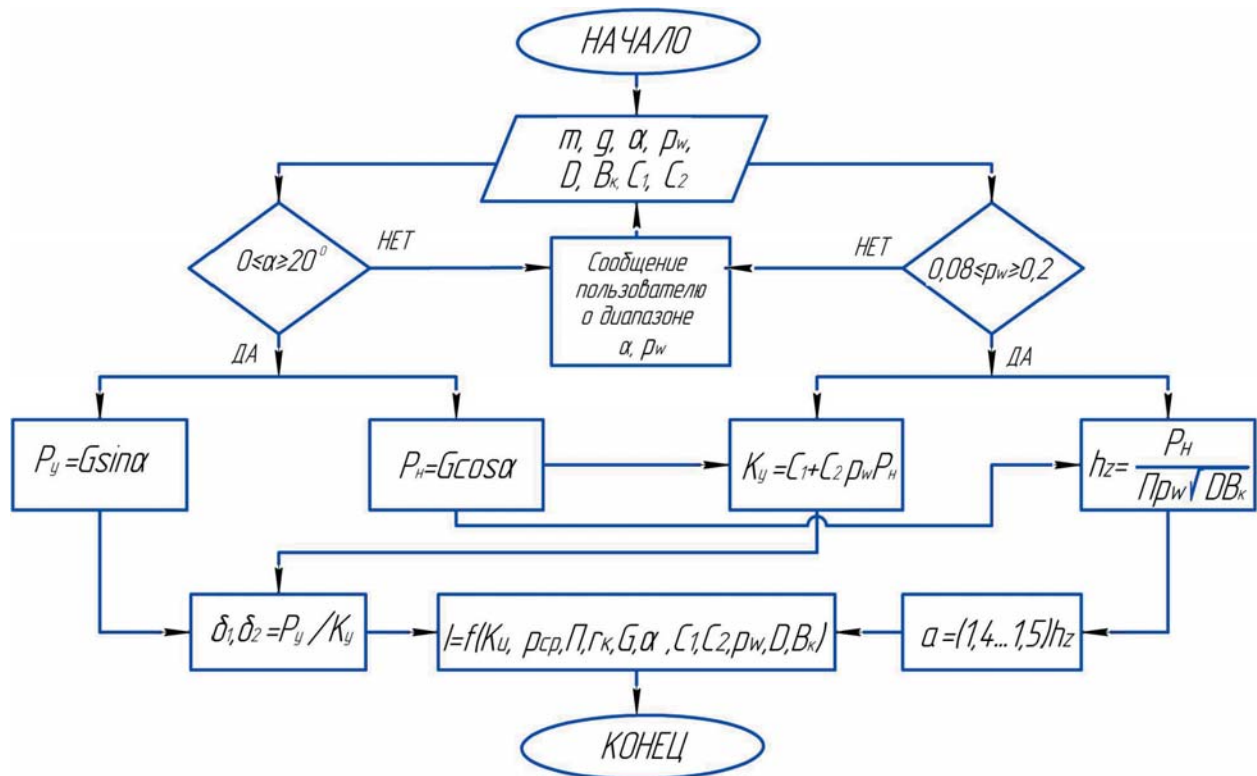


Рис. 4 – Алгоритм расчёта интенсивности износа шины при качении колеса по наклонной опорной поверхности

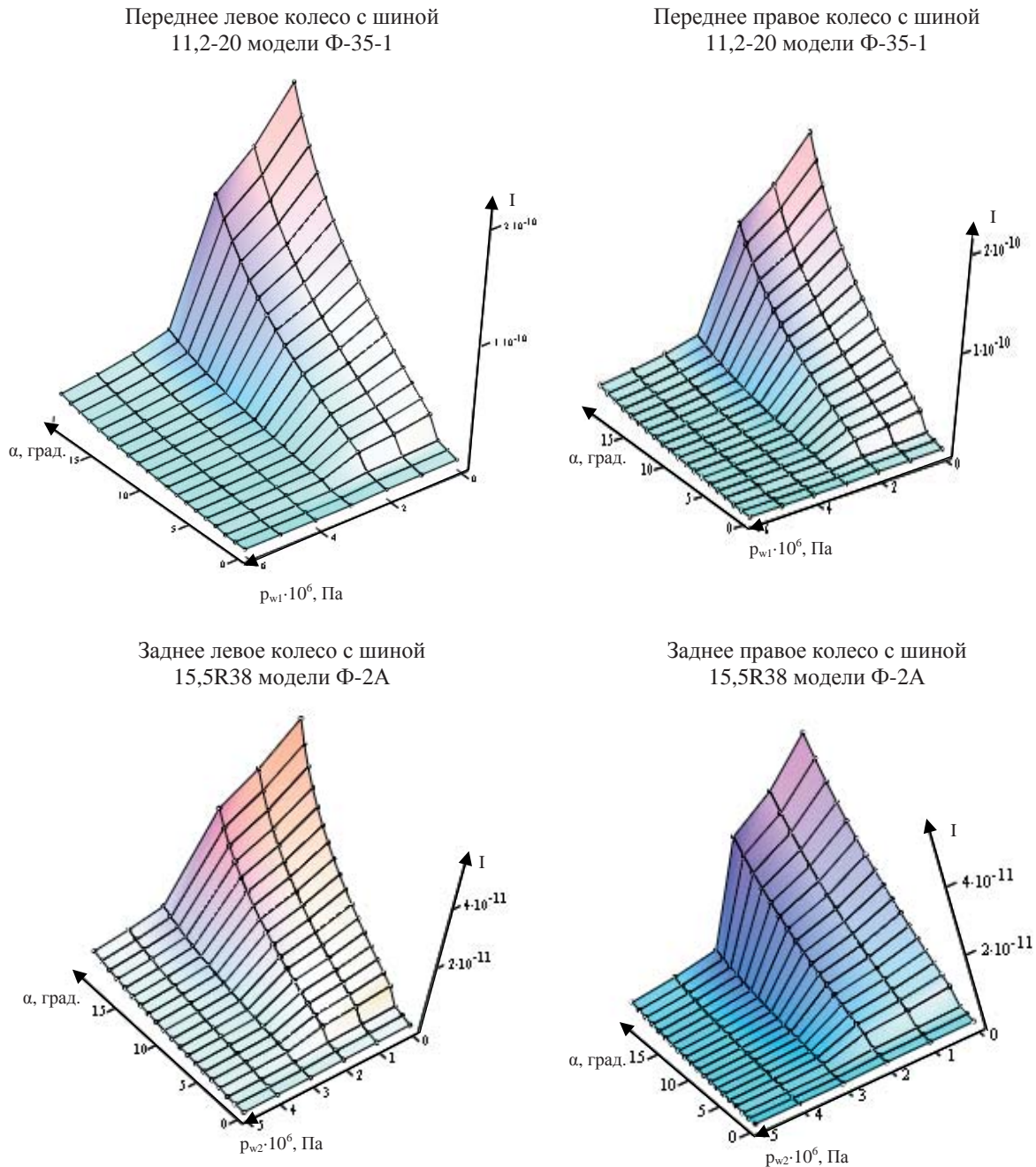


Рис. 5 – Функция интенсивности износа шин от внутришинного давления на различных склонах (правые колёса располагаются ниже по склону)

Для математического моделирования износа шин (рис. 4) целесообразно использовать параметры трактора МТЗ-82.1 с учётом его комплектации шинами моделей 11,2-20 Ф-35-1 и 15,5R38 Ф-2А соответственно передних и задних колёс. То есть были приняты условия: $p_{\omega 1} = [0,08 \text{ МПа}; 0,2 \text{ МПа}]$; $p_{\omega 2} = [0,08 \text{ МПа}; 0,18 \text{ МПа}]$; $\alpha = [0^\circ; 20^\circ]$; $G = 3150 \text{ кг}$, $\mu_{mp} = 0,07$; $C_1^{пер.к.} = 24,8$; $C_2^{пер.к.} = 10,3$, $D^{пер.к.} = 985 \text{ мм}$, $b_k^{пер.к.} = 284 \text{ мм}$; $r_k^{пер.к.} = 460 \text{ мм}$, $C_1^{задн.к.} = 25,5$; $C_2^{задн.к.} = 17,7$; $D^{задн.к.} = 1540 \text{ мм}$; $b_k^{задн.к.} = 394 \text{ мм}$; $r_k^{задн.к.} = 730 \text{ мм}$ [1–10].

Полученные поверхности отклика показали взаимосвязь трёх параметров, необходимых для удобства дальнейшего использования при анализе

износа шин (рис. 5). Анализ массива значений интенсивности износа на единицу длины показал, что с увеличением угла склона возрастает величина интенсивности износа для шины 11,2–20 до $2 \cdot 10^{-10}$, а для шины 15,5R38 – до $4 \cdot 10^{-11}$ относительно роста давления воздуха от 0,08 до 0,2 МПа.

Для удержания машины на траектории необходимо устанавливать допустимо низкое значение давления воздуха в колёсах заднего моста ($p_{\omega 2} = 0,08 \text{ МПа}$) в связи с тем, что они подвергаются тяговым нагрузкам, а также для создания излишней поворачиваемости трактора, что позволит увеличить интервал варьирования углов увода передних колёс. Таким образом, интенсивность износа за-

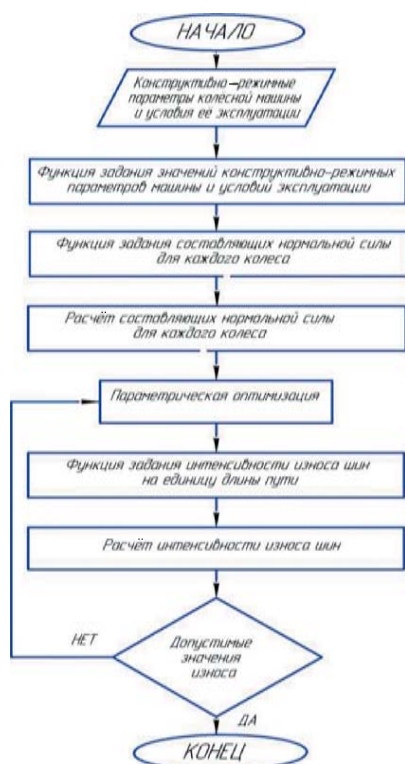


Рис. 6 – Алгоритм работы программы «Определение интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия»

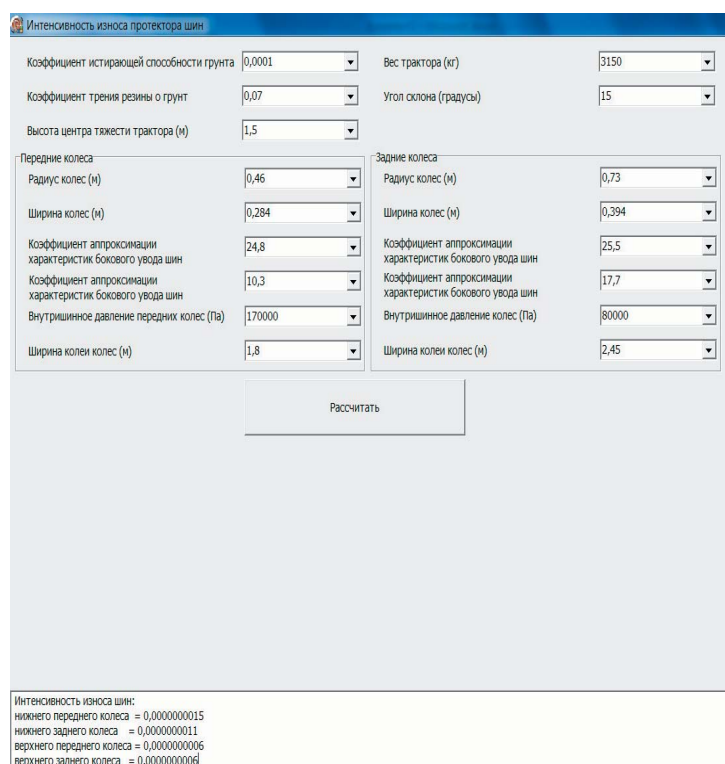


Рис. 7 – Интерфейсное окно программного средства «Определение интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия» (№ 2015614951)

дних колёс будет иметь постоянную величину, а величина интенсивности износа передних колёс будет изменяться за счёт изменения углов увода с 1° до 15°. Анализ результатов математических экспериментов показывает, что значение углов увода, лежащих в пределах [0°; 15°], незначительно влияет на интенсивность износа шин, что явилось ещё одним подтверждением целесообразности настоящих исследований.

Дальнейшие исследования по удержанию транспортного средства на технологической траектории при движении по склону целесообразно осуществлять на углах наклона от 3 до 20°. Данный интервал обусловлен тем, что до 5° склона увод машины от траектории незначительный, а в случае более 20° целесообразно использовать крутосклонные тракторы. Угол увода передних колёс должен варьироваться в пределах [0°; 15°], в данном интервале интенсивность износа шин 11,2–20 лежит в пределах допустимых значений.

Разработанный на основе совокупности предлагаемых различными авторами [1–5, 7, 9] методик вычислительный алгоритм расчёта интенсивности износа шин при качении колеса по наклонной опорной поверхности (рис. 2) делает возможным получение решения исходного уравнения (7), (8) с учётом совокупности числовых значений искомых величин интенсивности износа.

Программа предназначена для определения интенсивности износа протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия [10]. Функции формализуются конкретными формулами и интервалами допустимых значений, влияющих на процесс износа для соответствующих условий при ландшафтной нестабильности и эксплуатации колёсного движителя. Используется алгоритм, реализующий целевую функцию интенсивности износа протектора в пятне контакта с опорной поверхностью, в которую входят интервалы таких значений, как угол склона, вес трактора, радиус и ширина колеса, внутришинное давление, высота центра тяжести трактора, ширина колеи колёс и функции составляющих нормальной силы для каждого колеса, а также коэффициенты аппроксимации характеристик бокового увода шин, трения резины о грунт и истирающей способности грунта.

Алгоритм работы программы определения интенсивности изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия представлен на рисунке 6.

Моделирование процесса взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью при нестабильных ландшафтных условиях с использованием данного программного обеспечения решает проблемы, связанные с оптимизацией допусков эксплуатационных и технических параметров

транспортного средства, не требуя значительных материальных средств и времени (рис. 7).

Исследования подтверждены производственными экспериментами, реализованными в условиях Кувандыкского района Оренбургской области. Данный район расположен в наиболее возвышенной низкогорно-высокоравнинной части Оренбуржья, в связи с этим большинство полей представляют собой негоризонтальные поверхности.

Выводы.

1. Предложена функция интенсивности изнашивания протектора на единицу длины пути пневматического колеса, позволяющая определить дополнительный износ при варьировании углов увода шин относительно изменений углов наклона опорной поверхности.

2. Разработано программно-аналитическое обеспечение в виде алгоритма и программного средства, позволяющее проведение математического эксперимента по определению величин износа шин передних и задних колёс эксплуатируемого трактора в технологических процессах в условиях склонного земледелия.

Литература

1. Загородний Н.А. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей обеспечением рациональных значений эксплуатационных параметров их шин: дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2010.
2. Яковенко В.И. Метод повышения износостойкости пневматических шин: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2004.
3. Чудаков Д.А. Основы теории и расчёта тракторов и автомобилей. М.: Колос, 1972. 364 с.
4. Шарара А.С. Исследование бокового увода и влияние его на кинематические и силовые параметры качения тракторных колёс: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Киев, 1971. 20 с.
5. Бойков В.П., Белковский В.Н. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин. М.: Агропромиздат, 1988.
6. Тарасова С.В., Ушаков Ю.А. Экспериментальная модель определения величины полного поперечного смещения колёсного трактора от технологической траектории на склоне // Проблемы и перспективы развития сельского хозяйства и сельских территорий: матер. IV междунар. науч.-практич. конф. Саратов, 2015. С. 136–141.
7. Петрушов В.А. Зависимость нормальной прогиба пневматической шины от нормальной нагрузки и внутреннего давления воздуха. М.: Труды НАМИ., 1976. Вып. 158. С. 3–11.
8. Тарасова С.В., Ушаков Ю.А. Интерпретация результатов теоретических и экспериментальных исследований курсовой стабилизации колёсного трактора при работе на склоне // Современные тенденции в науке и образовании: сб. науч. трудов по матер. Междунар. науч.-практич. конф. М., 2015. С. 77–85.
9. Горшков Ю.Г. Определение рационального давления воздуха в шинах колёсных машин (тракторов) при выполнении транспортных работ / Ю.Г. Горшков, А.В. Богданов, Ю.Б. Четыркин, Е.А. Лещенко // Вестник ЧГАА. 2012. Т. 61. С. 26–30.
10. Свидетельство РФ № 2015614951 Определение интенсивности износа протектора на единицу пути пневматического колеса в условиях склонного земледелия / Тарасова С.В., Ушаков Ю.А., Асманкин Е.М., Горельская Е.В. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Оренбургский ГАУ (RU), опубл. 30.04.2015.