

# МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЭПЮР КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА БУКСУЮЩЕГО КОЛЕСА С ПОЧВОЙ

## THE METHOD OF CONSTRUCTING THE DIAGRAMS OF TANGENTIAL STRESSES IN THE CONTACT ZONE OF AN AXLE WHEEL WITH SOIL

З.А. ГОДЖАЕВ<sup>1</sup>, д.т.н.А.В. РУСАНОВ<sup>1</sup>В.Ю. РЕВЕНКО<sup>2</sup>, к.т.н.<sup>1</sup> ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия<sup>2</sup> ФГБНУ «Армавирская опытная станция ВНИИМК»,  
Россия, fic51@mail.ruZ.A. GODZHAEV<sup>1</sup>, DSc in EngineeringA.V. RUSANOV<sup>1</sup>,V.YU. REVENKO<sup>2</sup>, PhD in Engineering<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow,  
Russia<sup>2</sup> Federal state budgetary scientific institution "All-Russian  
Research Institute of Oil Crops be the name of Pustovoi V.S.",  
Russia, fic51@mail.ru

Рассмотрен процесс взаимодействия ведущих колес мобильных энергетических средств с почвой. Предложен расчетно-экспериментальный метод построения эпюр касательных напряжений в зоне контакта буксующего колеса с опорной поверхностью, основанный на использовании эпюр нормальных напряжений, полученных для конкретных грунтовых условий. Детально изучен характер взаимодействия ведущего колеса трактора с различными видами опорного основания: грунтовой дорогой, стерней, полем, подготовленным под посев. Выявлено, что вопреки общепринятым представлениям, у буксующего колеса практически отсутствует зона сцепления в пятне контакта. После касания почвозацепа опорной поверхности, он сразу начинает смещаться назад. Следовательно, при расчете величины касательных напряжений в пятне контакта буксующего колеса с опорой более корректно считать, что сдвиг элементарных точек растет по мере их удаления от входа в зону контакта и зависит от величины буксования. При качении ведущего колеса даже с незначительным буксованием по деформируемой поверхности в месте соприкосновения двух контактирующих тел (шины и грунта) практически отсутствует зона сцепления. На поверхности почвы нормальные напряжения достигают своего максимума, постепенно уменьшаясь с ростом глубины залегания ее слоев. При незначительном буксовании (до 10 %), максимальные значения тангенциальных напряжений возникают в задней части пятна контакта – в зоне наибольших сдвиговых деформаций грунта. С ростом тяговой нагрузки касательные контактные напряжения смещаются в центр пятна контакта – в зону, где деформации грунта не превысила оптимального уровня, характерного для каждого конкретного типа почв. Таким образом, удлинение пятна контакта шины эффективно до определенного уровня, ограниченного предельными значениями сдвиговой деформации почвы, выше которой тангенциальные напряжения перестают расти и для большинства типов связных почв даже начинают снижаться. Выявлено, что чрезмерное увеличение сдвиговой деформации почвы при буксовании приводит к снижению коэффициента полезного действия колесного движителя.

**Ключевые слова:** ведущее колесо, буксование, пятно контакта, деформация, почва, нормальные напряжения, тангенциальные напряжения.

The process of interaction of the driving wheels of mobile energy resources with soil is considered. A computational and experimental method is proposed for plotting the shear stresses in the contact zone of the skid wheel with a supporting surface, based on the use of normal stresses obtained for specific ground conditions. The character of the interaction of the driving wheel of the tractor with various types of supporting base has been studied in detail: a dirt road, stubble, a field prepared for sowing. It is revealed that, contrary to the generally accepted ideas, the slipping wheel has practically no adhesion zone in the contact spot. After touching the tiller of the supporting surface, it immediately begins to shift backward. Therefore, when calculating the shear stresses in the contact spot of the skid wheel with the support, it is more correct to assume that the shift of the elementary points increases as they move away from the entrance to the contact zone and depends on the amount of slippage. When rolling the drive wheel, even with a slight slippage on the deformable surface, there is practically no bonding zone at the point of contact between the two contacting bodies (the tire and the ground). On the surface of the soil, normal stresses reach their maximum, gradually decreasing with increasing depths of its layers. With a slight slipping (up to 10 %), the maximum tangential stresses occur at the back of the contact spot - in the zone of the largest shear deformations of the soil. As the traction load increases, the tangential contact stresses are shifted to the center of the contact patch – to the zone where the deformations of the soil did not exceed the optimum level characteristic for each specific soil type. Thus, the elongation of the tire contact patch is effectively up to a certain level limited by the limiting values of shear deformation of the soil above which the tangential stresses cease to grow and even begin to decline for most types of cohesive soils. It was found that an excessive increase in shear deformation of the soil at slippage leads to a decrease in the efficiency of the wheeled propulsor.

**Keywords:** drive wheel, slippage, contact spot, deformation, soil, normal stresses, tangential stresses.

## Введение

Центральное место в теории взаимодействия движителя с опорной поверхностью занимает вопрос об элементарных реакциях, или силах, действующих на колесо в каждой точке пятна контакта. В сумме они образуют движущую силу трактора, силу сопротивления качению, определяют закон распределения контактных давлений. Знание закона распределения напряжений в зоне контакта протектора с почвой играет важную роль в решении задачи оптимизации параметров шин сельскохозяйственной техники. От конструктивных особенностей шины (жесткости ее резинокордной оболочки, рисунка протектора, формы, высоты грунтозацепов и др. показателей) зависит КПД колеса и ходовой системы в целом. От формы эпюры распределения контактных давлений по площади соприкосновения колеса с почвой, а именно степени ее неравномерности, зависит и величина уплотнения грунта движителем.

## Цель исследования

Разработать расчетно-экспериментальный метод построения эпюр касательных (тангенциальных) напряжений в зоне контакта шины с почвой по полученным в реальных почвенных условиях эпюрам нормальных напряжений.

## Материалы и методы

Экспериментальным путем нельзя сразу получить эпюры тангенциальных напряжений. Дело в том, что их определение в чистом виде затруднено технически. Существующие в настоящее время методы и способы инструментальной оценки величины и характера распределения касательных напряжений реализованы в подавляющем большинстве случаев для жестких опорных оснований. Для грунтов с различной несущей способностью данные практически отсутствуют, а те, что иногда появляются в открытых публикациях, крайне противоречивы. В то же время задача измерения нормальных напряжений в пятне контакта колеса с почвой не представляет особой сложности и довольно успешно решена с помощью датчиков, встроенных либо в протектор, либо в опорную поверхность. Построив по результатам измерений эпюру распределения нормальных напряжений и зная величину сдвиговой деформации элементарных точек контактирующих тел в результате буксования, можно определить по известным из теории трактора

формулам величину и характер распределения тангенциальных напряжений в каждой точке пятна контакта.

В соответствии с поставленной задачей рассмотрим существующие математические модели, описывающие связь касательных напряжений с нормальными и выберем наиболее подходящую к реальным почвенным условиям.

В общем случае касательные напряжения  $\tau$ , возникающие при сопротивлении почвы сдвигу, можно определить по закону Кулона:

$$\tau = C_m + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение, кПа;  $C_m$  – молекулярные и капиллярные силы сцепления, кПа;  $\operatorname{tg} \varphi$  – тангенс угла внутреннего трения почвы.

Беккер М.Г. [1], на основании экспериментальных данных, предложил следующее выражение для расчета  $\tau$ :

$$\tau = \frac{C_m + \sigma \operatorname{tg} \varphi}{y_{\max}} \left[ \exp(-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 1}) k_1 \delta x - \exp(-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 1}) k_1 \delta x \right],$$

где  $y_{\max}$  – максимальное значение величины, заключенной в квадратные скобки;  $k_1$ ,  $k_2$  – постоянные коэффициенты деформации, определяемые на основе кривых сдвига грунта;  $\delta$  – величина буксования колеса;  $x$  – расстояние от передней кромки опорной поверхности до рассматриваемой точки буксования, м.

Учитывая пластичность грунтов, данная формула была в дальнейшем упрощена Джано-зи и Ханамото [2]:

$$\tau = (C_m + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi) \left( 1 - e^{-\frac{\delta x}{k}} \right), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент деформации, определенный по кривой сдвигу грунта, м.

Покровский Г.И., применяя к явлениям трения и сцепления статистические закономерности, использовал следующее выражение:

$$\tau = (C_1 e^{-C_3 \delta} + C_2) (1 - e^{-C_4 \delta}),$$

где  $C_1$  – коэффициент, характеризующий связную почву, при деформации которой происходит изменение ее структуры;  $C_2$  – коэффициент, пропорциональный числу точек соприкосновения частиц почвы, которое не изменяется с изменением структуры почвы в процессе смещения грунтозацепа;  $C_3$  и  $C_4$  – постоянные величины.

Обобщая особенности модели Покровского Г.И. и используя гиперболические функции, Кацыгин В.В. [3] предложил определять касательные напряжения по следующей зависимости:

$$\tau = f_{\text{ск}} \sigma \left( 1 + \frac{f_{\text{пр}}}{c \cdot h \cdot \Delta / k_{\tau}} \right) \text{th} \frac{\Delta}{k_{\tau}}, \quad (3)$$

где  $f_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент трения в почве;  $k_{\tau}$  – коэффициент деформации, м;  $\Delta$  – деформация почвы, м.

$$f_{\text{пр}} = 2,55 \left( \frac{f_{\text{п}} - f_{\text{ск}}}{f_{\text{ск}}} \right)^{0,825},$$

где  $f_{\text{ск}}$  и  $f_{\text{п}}$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно.

Для грунтов нормальной влажности  $k_{\tau} \approx 0,4t$ , где  $t$  – шаг почвозацепов колеса, м.

Для пластичных грунтов, когда  $f_{\text{п}} = f_{\text{ск}}$  и  $f_{\text{пр}} = 0$ :

$$\tau = f_{\text{ск}} \cdot \sigma \cdot \text{th} \frac{\Delta}{k_{\tau}}.$$

На основании формулы (2) Агейкиным Я.С. предложена следующая функциональная зависимость касательных напряжений от деформации грунта и нормального давления  $\tau = f(\sigma, \Delta)$  [4]:

$$\tau = [\sigma \cdot \text{tg} \varphi + C_o (1 - \Delta / t)] \cdot (1 - e^{\Delta / k_t}),$$

где  $\Delta$  – сдвиг грунта, м;  $k_t$  – коэффициент тангенциальной эластичности грунта.

Наилучшая сходимость расчетных и экспериментальных значений контактных напряжений была получена при использовании закономерностей Джанози – Ханамото (2) и Кацыгина В.В. (3). В этих формулах, как и в остальных, касательные напряжения  $\tau = f(\sigma, \Delta)$  зависят от уровня нормального давления  $\sigma$  и величины смещения  $\Delta$  каждой из элементарных точек соприкосновения двух контактирующих тел (шины и почвы). Корректное определение последней составляющей является крайне важной задачей.

Из классической теории трактора известно, что элементарные реакции грунта, возникающие при качении колеса, пропорциональны нормальному напряжению, ширине колеса и длине дуги, являющейся траекторией движения частиц грунта при взаимодействии его с колесом. Именно от траектории движения точек периметра шины зависит характер процесса возникновения и действия элементарных реакций. В работах Полетаева А.Ф., Гусько-

ва В.В. [2], где описано взаимодействие жесткого колеса с почвой, поверхность контакта разбита на две зоны – сцепления и буксования. Зона сцепления – поверхность контакта, на которой отсутствует перемещение обода колеса относительно основания. Зона буксования – поверхность контакта, на которой колесо проскальзывает относительно грунта в сторону, противоположную направлению поступательной скорости. Следовательно, от режима качения колеса, положения мгновенной оси вращения (уровня буксования или скольжения), траектории движения периметра обода относительно почвы будет зависеть величина сил сопротивления качению и движущих сил в пятне контакта.

## Результаты и их обсуждение

Исследования, проводимые в ВИМе и на Армавирской опытной станции, позволили детально изучить характер взаимодействия ведущего колеса трактора с различными видами опорного основания: грунтовой дорогой, стерней, полем, подготовленном под посев [5]. Выявлено, что вопреки общепринятым представлениям, у буксующего колеса практически отсутствует зона сцепления в пятне контакта. После касания почвозацепа опорной поверхности он сразу начинает смещаться назад. Таким образом, при расчете величины касательных напряжений в пятне контакта буксующего колеса с опорой более корректно считать, что сдвиг элементарных точек растет по мере их удаления от входа в зону контакта и зависит от величины буксования.

На рис. 1 приведены траектории движения почвозацепов шины, построенные на основании разработанной нами математической модели, от момента контакта с опорной поверхностью до выхода из соприкосновения с ней [5]. В момент, когда первый почвозацеп коснется опоры, второй сместится назад по горизонтали на определенную величину. Третий будет иметь максимальное смещение, равное произведению длины контакта на величину буксования  $\Delta_{\text{max}} = L \cdot \delta$ . Четвертый выйдет из зоны контакта и продолжит движение по усеченной циклоиде. В нижней части рис. 1 показана эпюра сдвига почвозацепа по мере его удаления от переднего края зоны контакта.

На рис. 2 и 3 приведены результаты измерения величины смещения грунтозацепов буксующей шины 28LR26 трактора МТЗ-1221

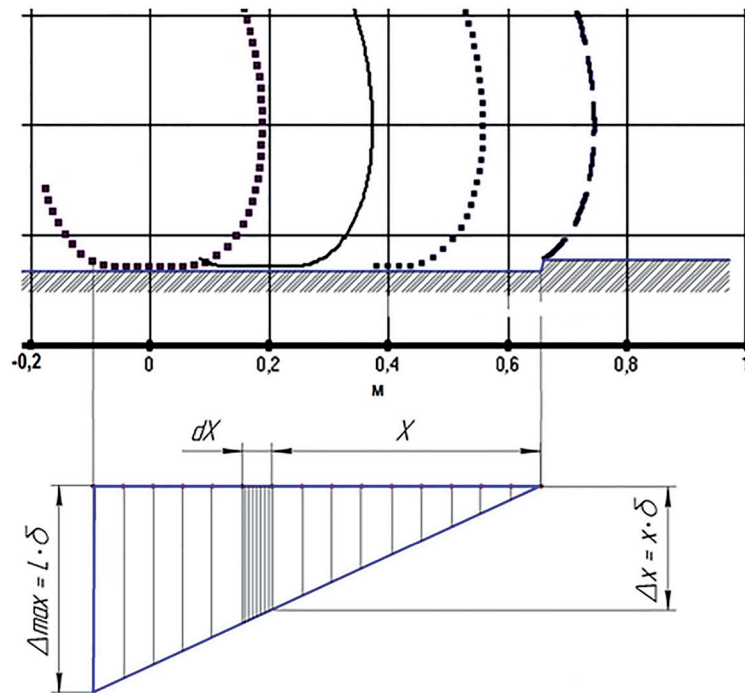


Рис. 1. Траектории последовательного входа почвозацепов эластичной шины в контакт с опорной поверхностью

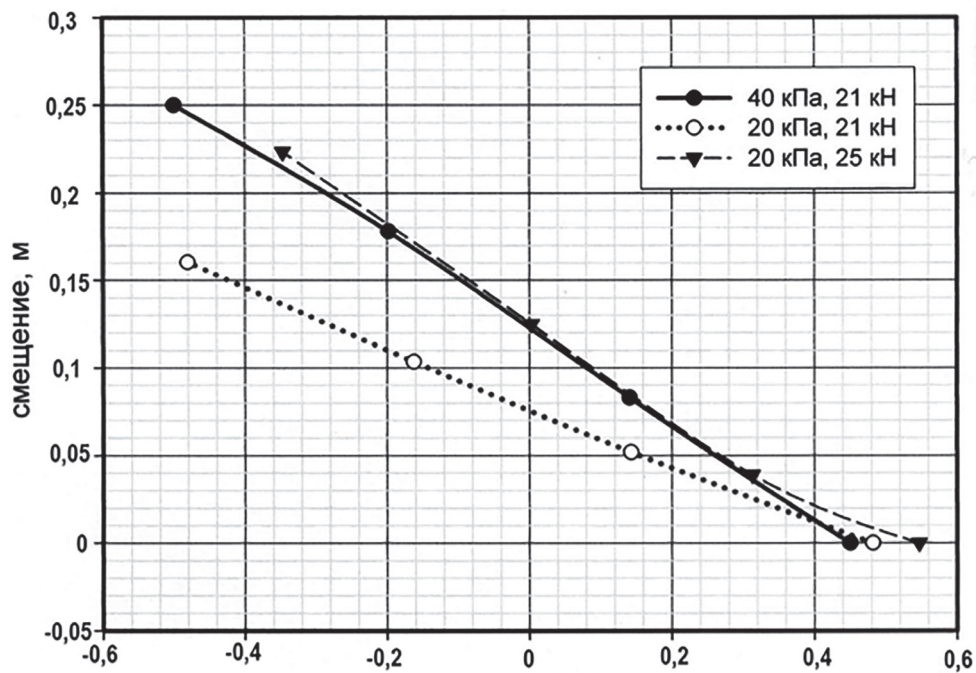


Рис. 2. Смещение почвозацепов на грунтовой дороге при разных уровнях буксования

на грунтовой дороге и взрыхленном поле при различной тяговой нагрузке и величине внутришинного давления. По оси абсцисс отложены координаты точки входа почвозацепов в контакт с опорой относительно нулевой линии (вертикальной оси, проходящей через центр колеса).

Как следует из приведенных графиков, рост внутришинного давления  $P_w$  увеличивает величину буксования и смещения почвозацепов в направлении, противоположном поступательному движению. Так, при тяговой нагрузке 23 кН и давлении  $P_w = 20$  кПа максимальная величина горизонтального сдвига почвы со-

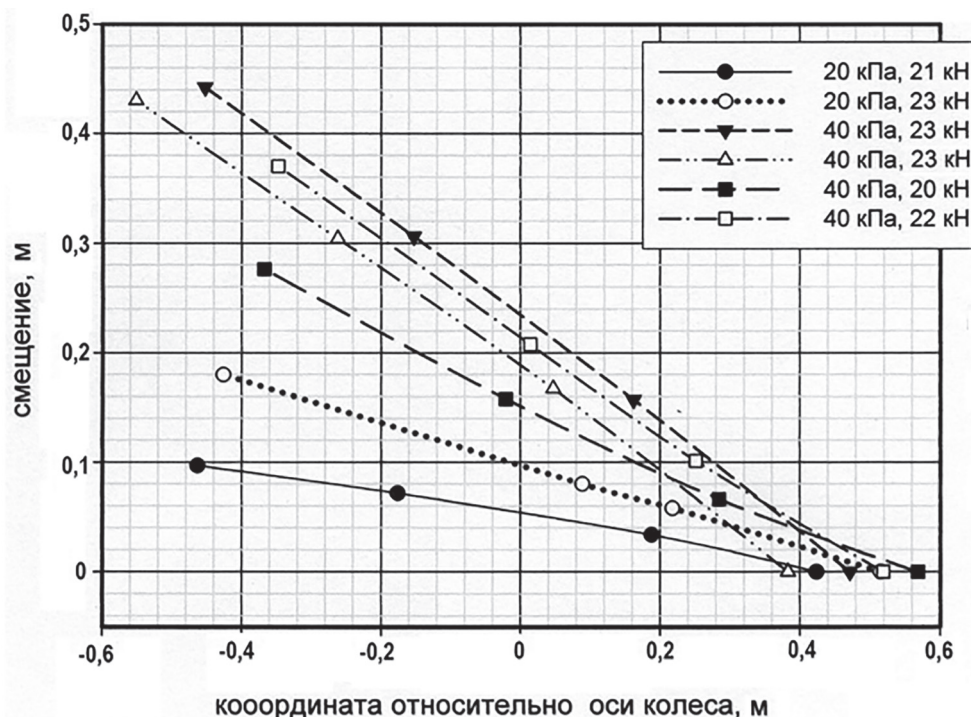


Рис. 3. Смещение почвозацепов на поле, подготовленном под посев

ставляет 0,18 м, при  $P_w = 40$  кПа и той же тяговой нагрузке – 0,44 м. Уменьшение тяговой нагрузки приводит к соответствующему снижению величины скольжения почвозацепов. Отметим, что аналогичные результаты были получены и на стерневом фоне.

Детальное изучение процесса буксования эластичной шины позволило выделить его три основные составляющие: первая – скольжение почвозацепов в результате деформации грунта в направлении, противоположном поступательному движению трактора; вторая – тангенциальная деформация элементов протектора шины (их сжатие перед входом в контакт с опорой); третья – закручивание обода колеса относительно протектора в результате деформации резинокордной оболочки. Последняя составляющая буксования, а именно податливость шины в окружном направлении, позволяет демпфировать переменное тяговое сопротивление, нивелировать резонансные явления, возникающие в трансмиссии, а также предотвратить дополнительный срыв грунта в процессе буксования, что положительно сказывается на динамике работы машинно-тракторного агрегата.

Таким образом, при расчете тангенциальных напряжений будем использовать приведенную выше аргументацию, что касательная деформация почвы равна величине сдвига

грунтозацепа и пропорциональна уровню буксования.

Для получения эпюры тангенциальных напряжений в качестве исходных данных воспользуемся эпюрой нормальных напряжений, полученной в результате измерений в конкретных почвенных условиях. В качестве примера на рис. 4 приведена эпюра распределения нормальных напряжений, возникающих при движении трактора Т-150КШ, оснащенного шинами размерности 66С43R-25. Измерения

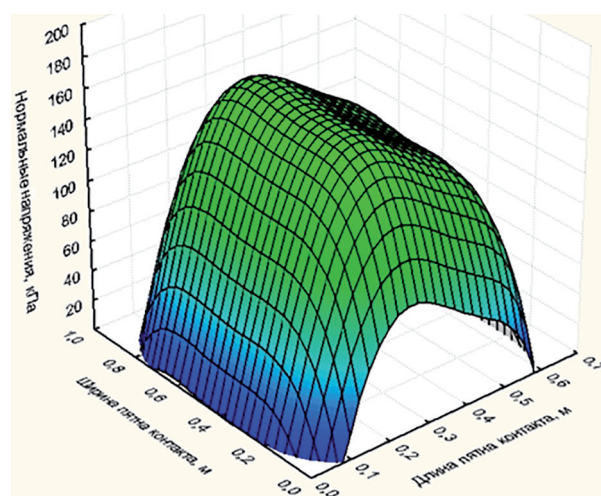


Рис. 4. Эпюра нормальных давлений, полученная с помощью встроенных в грунтозацепы датчиков

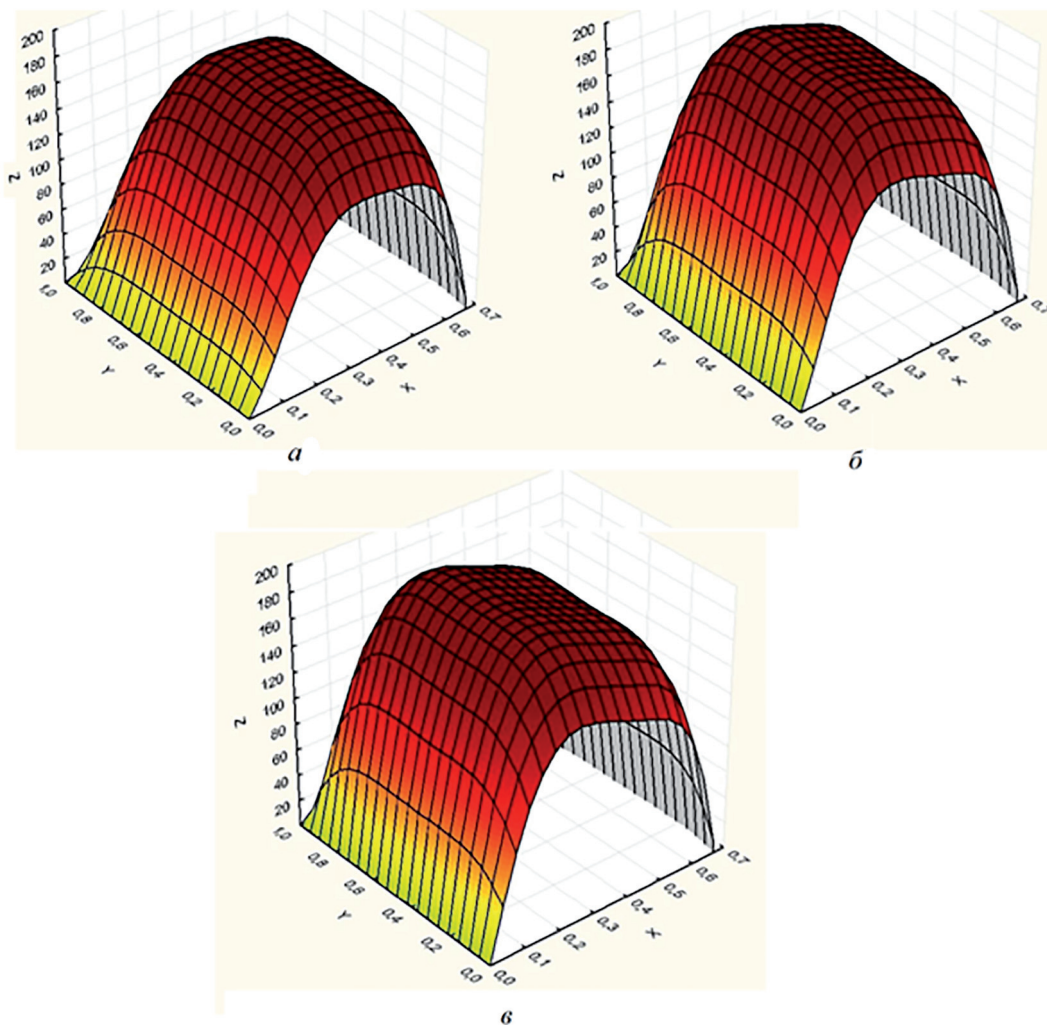


**Рис. 5. Деформация шины ведущего колеса трактора при движении с предельной по уровню буксования тяговой нагрузкой**

проходили с применением запатентованных деформируемых датчиков давления на поле, подготовленном под посев, при тяговой нагрузке 32 кН.

Форма трехмерной эпюры указывает на то, что максимальные напряжения возникают во фронтальной части пятна контакта. Об этом косвенно свидетельствует и характер деформации боковины резинокордной оболочки шины трактора, движущегося с высокой тяговой нагрузкой (рис. 5). Больше всего она деформируется (сминается) в момент входа в зону контакта, а затем распрямляется по мере продвижения почвозацепов к заднему краю пятна контакта. Окончательное снятие всех деформаций и напряжений резинокордной оболочки происходит в момент выхода протектора из зоны соприкосновения с опорной поверхностью.

Наиболее полно характерные особенности распределения нормальных напряжений в пятне контакта колес тракторов и сельскохозяйственных машин, движущихся по различным видам опорного основания, представлены в работах проф. Русанова В.А. [6].



**Рис. 6. Изменения эпюр касательных напряжений в пятне контакта в зависимости от уровня буксования:**  
 $Z$  – касательные напряжения, кПа;  $Y$  – ширина пятна контакта, м;  $X$  – длина пятна контакта, м;  
 $a - \delta = 10\%$ ;  $б - \delta = 20\%$ ;  $в - \delta = 30\%$

Зная величину нормального напряжения в каждой элементарной точке пятна контакта –  $\sigma = f(x, y)$ , рассчитаем по формулам (2) и (3) величину касательных напряжений  $\tau = f(x, y)$ , возникающих в этих точках при развитии колесом касательной силы тяги. Исходные данные, необходимые для построения эпюры нормальных напряжений, представим в виде функции двух переменных:  $\sigma = f(x, y)$ , где  $x$  и  $y$  – координаты точек пятна контакта. Аппроксимацию в настоящее время несложно проводить с помощью специализированного прикладного программного обеспечения типа: Universal Approximator, DataFit, Origin, QtiPlot и др., задав при этом уровень коэффициента детерминации  $R^2 \geq 0,96$ . В нашем случае заданный уровень точности можно достичь с использованием полинома не ниже 5-й степени относительно двух переменных.

Границы вариации независимых переменных: значение  $x$  – от 0 до 0,7 м (длина пятна контакта),  $y$  – от 0 до 0,95 м (ширина пятна контакта).

Используя математические модели Джанози – Ханамото и Кацыгина В.В., построим эпюры касательных напряжений  $\tau = f(x, y)$  с помощью прикладных статистических программ типа SPSS, STATA, STATGRAPHICS PLUS, StatSoft STATISTICA, SAS. Значения коэффициентов, входящие в уравнения (2) и (3), возьмем по результатам инструментальной оценки физических свойств почвы, на которой проводились исследования:  $\text{tg}\varphi = 0,572$ ;  $C_m = 110$  кПа;  $k_\tau = 0,12$  м;  $f_{\text{ск}} = 0,76$ ;  $f_{\text{п}} = 0,9$ ;  $f_{\text{пр}} = 0,87$ .

На рис. 6 приведены результаты расчета с использованием зависимости (2). Слева направо расположены эпюры касательных напряжений, полученные при различной величине

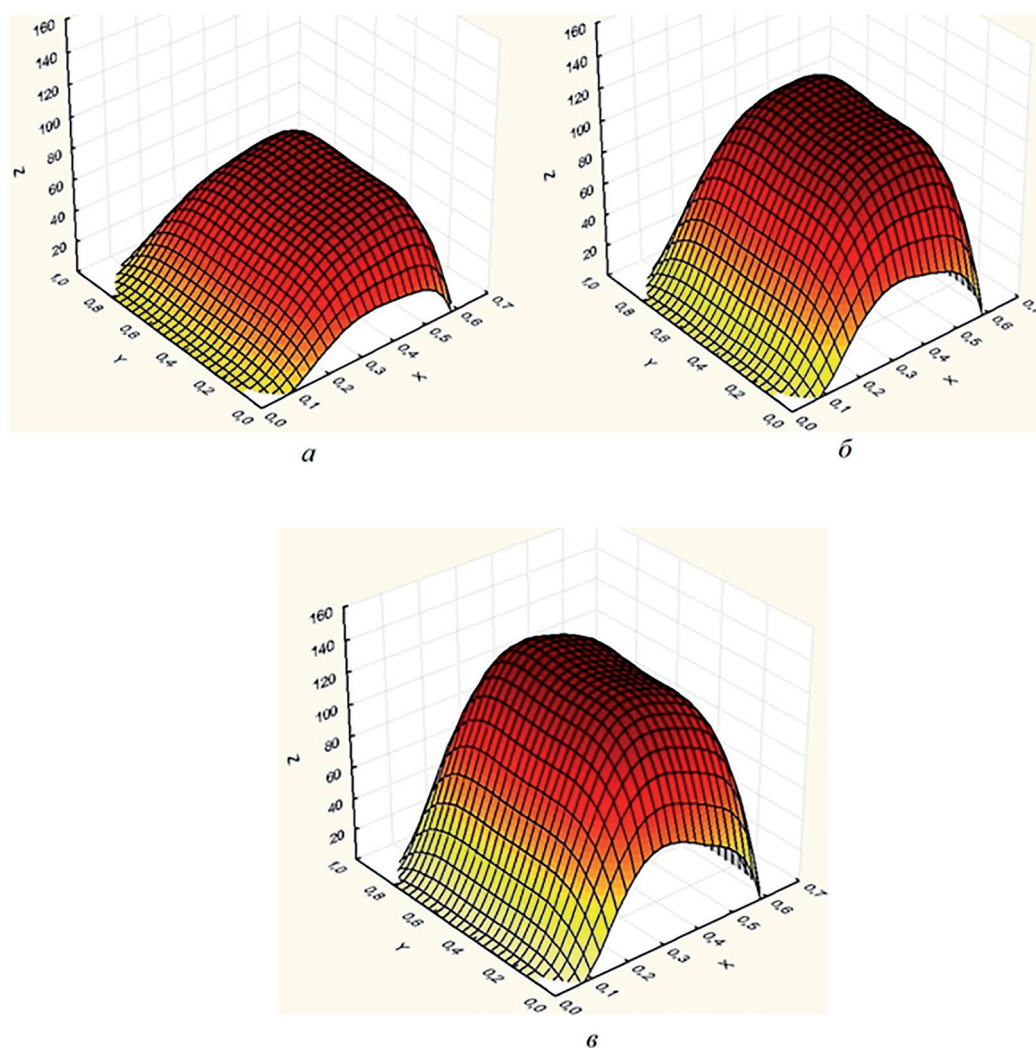


Рис. 7. Расчетные эпюры касательных напряжений, полученные с использованием математической модели В.В. Кацыгина:  $Z$  – касательные напряжения, кПа;  $Y$  – ширина пятна контакта, м;  $X$  – длина пятна контакта, м; а –  $P_{\text{кр}} = 14$  кН; б –  $P_{\text{кр}} = 29$  кН; в –  $P_{\text{кр}} = 40$  кН

не тяговой нагрузки на трактор, с соответствующим уровнем буксования в 10, 20 и 30 %.

На рис. 7 изображены эпюры напряжений, полученные по результатам расчета в соответствии с рекомендациями Кацыгина В.В.

Анализируя характер изменения эпюр тангенциальных напряжений, отметим, что с ростом тяговой нагрузки  $P_{кр}$ , а следовательно, и буксования контактные напряжения возрастают. Это очевидный факт, так как именно тангенциальные напряжения формируют касательную силу тяги ведущего колеса. Максимальные значения тангенциальных напряжений, рассчитанные по формуле (2), превышают в 1,5–2,5 раза соответствующие показатели, полученные с использованием зависимости (3). Но по результатам интегрирования напряжений, дающих в сумме величину касательной силы тяги, развиваемой шиной 66Ч43R-25 на взрыхленном поле, более точные показатели дает модель В.В. Кацыгина. Приведенные на рис. 7 эпюры соответствуют крюковой нагрузке в 14, 29 и 40 кН, что примерно соответствует экспериментальным данным.

Независимо от варианта расчета (с использованием зависимости (2) или (3)) при уровне буксования до 10 % максимальные касательные напряжения формируются в зоне наибольшей сдвиговой деформации почвы, находящейся в задней части пятна контакта (см. первые эпюры на рис. 6 и 7). С ростом буксования, максимумы напряжений смещаются ближе к месту входа почвозацепов в соприкосновение с опорной поверхностью. Т.е. увеличение сдвиговой деформации почвы в задней части пятна контакта не вызывает адекватный рост касательных напряжений. Их максимумы смещаются в центральную часть контактной зоны, т.е. туда, где деформация почвы не превысила определенный пороговый уровень, выше которого тангенциальные напряжения  $\tau_{max}$  перестают расти, а для большинства типов связных почв даже начинают снижаться.

Приведенные эпюры тангенциальных напряжений в очередной раз доказывают тот факт, что максимальная эффективность процесса взаимодействия ведущего колеса с грунтовой поверхностью будет получена при уровне буксования, не превышающем некоторый оптимальный предел. По характеру распределения касательных напряжений в зоне контакта можно судить об уровне КПД колесного движителя для каждого конкретного типа

почв, имеющих свое значение коэффициента трения покоя  $-f_n$ . В нашем случае эластичная шина с удлиненным пятном контакта будет развивать более высокую силу тяги, чем шина с меньшей длиной контактной зоны, но ее КПД при одном и том же уровне буксования будет несколько ниже.

## Выводы

При качении даже с незначительным буксованием ведущего колеса по деформируемой поверхности в месте соприкосновения двух контактирующих тел (шины и грунта) практически отсутствует зона сцепления. Сдвиг почвозацепа в направлении, противоположном поступательному движению трактора, начинается происходить сразу после его входа в пятно контакта. Величина сдвиговой деформации пропорциональна уровню буксования.

На поверхности почвы нормальные напряжения достигают своего максимума, постепенно уменьшаясь с ростом глубины залегания ее слоев. При незначительном буксовании (до 10 %) максимальные значения тангенциальных напряжений возникают в задней части пятна контакта – в зоне наибольших сдвиговых деформаций грунта.

С ростом тяговой нагрузки касательные контактные напряжения смещаются в центр пятна контакта – в зону, где деформации грунта не превысили оптимального уровня, характерного для каждого конкретного типа почв. Таким образом, удлинение пятна контакта шины либо треугольного резино-армированного гусеничного движителя эффективно до определенного уровня, ограниченного предельными значениями сдвиговой деформации почвы, выше которой тангенциальные напряжения  $\tau_{max}$  перестают расти и для большинства типов связных почв даже начинают снижаться. Это отрицательно влияет на КПД соответствующего движителя.

## Литература

1. Беккер М.Г. Введение в теорию системы местность – машина. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
2. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. Тракторы. Теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
3. Кацыгин В.В., Горин Г.С., Зенькович А.А. Перспективные мобильные энергетические средства (МЭС) для сельскохозяйственного производства. Минск: Наука и техника, 1982. 272 с.
4. Агейкин Я.С. Моделирование движения автомобиля по мягким грунтам: проблемы и решения //

Автомобильная промышленность. 2004. № 10. С. 12–15.

5. Ревенко В.Ю. Русанов А.В. Некоторые аспекты кинематики качения ведущего колеса трактора // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 2. С. 28–31.
6. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почвы движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ, 1998. 368 с.

## References

1. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistemy mest-nost'-mashina [Introduction to the theory of the terrain-machine system]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 520 p.
2. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. Traktory. Teoriya [Tractors. Theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p.
3. Katsygin V.V., Gorin G.S., Zen'kovich A.A. Perspektivnye mobil'nye energeticheskie sredstva (MES) dlya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva [Perspective mobile energy resources (MERs) for agricultural production]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1982. 272 p.
4. Ageykin Ya.S. Modeling the vehicle's motion along soft soils: problems and solutions. Avtomobil'naya promyshlennost'. 2004. No 10, pp. 12–15.
5. Revenko V.Yu. Rusanov A.V. Some aspects of the kinematics of the driving wheel of the tractor Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2010. No 2, pp. 28–31.
6. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochvy dvizhitel'nyami i effektivnye puti ee resheniya [The problem of soil re-consolidation by propulsors and effective ways to solve it]. Moscow: VIM Publ., 1998. 368 p.