

УДК (УДК) 629.113

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ТРИЦИКЛА ПРОТИВ ОПРОКИДЫВАНИЯ НА КОСОГОРЕRESULTS OF MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELING OF TRICYCLE
STABILITY AGAINST OVERTURNING ON A SLOPEПицхелаури Ш.Н.
Pitskhelauri S.N.Горский государственный аграрный университет» (Владикавказ, Россия)
Gorsky State Agrarian University (Vladikavkaz, Russian Federation)

Аннотация. Одним из важных эксплуатационных показателей движения колесной машины на склоне, является поперечная устойчивость, которая характеризует ее способность работать на уклонах без опрокидывания. Обеспечение надежной поперечной устойчивости колесных машин является важнейшим условием их безаварийной работы. В работе рассматривается математическое и имитационное моделирование устойчивости трицикла против опрокидывания на косогоре. Трицикл может потерять устойчивость как на горизонтальной плоскости, так и на наклонной плоскости. Наиболее опасным режимом движения колесной машины является движение по склону, при котором может произойти потеря устойчивости. Отмечено, что влияние конструктивных и эксплуатационных факторов создаёт опрокидывающий момент, который ухудшает устойчивость трицикла против опрокидывания на склонах. Исследования показали, что повышение устойчивости трицикла против опрокидывания при движении по склонам в поперечном направлении можно достичь смещением центра масс трицикла от продольной оси в сторону возвышенности склона, т.е. наклоном остова в сторону возвышенности склона относительно заднего моста в перпендикулярной относительно направления движения плоскости, такое изменение параметров способствует повышению устойчивости против опрокидывания на склоне, так как восстанавливающий момент возрастает по отношению опрокидывающему моменту.

Ключевые слова: трицикл, устойчивость, смещение центра масс, опрокидывание.

Дата принятия к публикации: 16.09.2020
Дата публикации: 25.09.2020

Сведения об авторе:

Пицхелаури Шота Нугзарович – аспирант кафедры «Эксплуатация и сервис транспортных средств», ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет»,
e-mail: shota.pitskhelauri.92@mail.ru

Abstract. Stability of a wheeled vehicle against overturning characterizes its ability to maintain a given position during the movement on the slope. One of the most important performance indicators of a wheeled vehicle on a slope is its lateral stability, which characterizes its ability to work on slopes without tipping over. Ensuring reliable lateral stability of wheeled vehicles is the most important condition for their trouble-free operation. The paper deals with mathematical and simulation modeling of tricycle stability against tipping on a slope. The tricycle can lose stability. The most dangerous mode of movement of a wheeled vehicle is driving on a slope, which can cause loss of stability. It is noted that the influence of structural and operational factors creates a tipping moment, which worsens the stability of the tricycle against tipping on the slopes. Studies have shown that increasing the stability of the tricycle against overturning when moving along the slopes in a transverse direction, can be achieved by shifting the center of mass from the longitudinal axis of the tricycle towards the elevation of the slope, i.e., by tilting the frame of the relative rear bridge in a perpendicular plane relative to the direction of movement towards the elevation of the slope, such a change in parameters contributes to increasing the stability against overturning on the slope, since the restoring moment will increase relative to the overturning moment.

Keywords: tricycle, stability, rollover, center of mass displacement.

Date of acceptance for publication: 16.09.2020
Date of publication: 25.09.2020

Author's information:

Shota N. Pitskhelauri – postgraduate student of the Department "Operation and service of transport vehicles" at Gorsky State Agrarian University,
e-mail: shota.pitskhelauri.92@mail.ru

1. Введение

В современном сельскохозяйственном производстве находят широкое применение трициклы с грузовой платформой. В некоторых случаях применение их для работы на склонах в фермерских хозяйствах ограничено из-за малой устойчивости [1].

В действительности при движении колесной машины по горным склонам возникают самые различные положения как и самой машины, так и дороги, по которой она перемещается. Создание мобильной легкой техники, приспособленной к работе в фермерских хозяйствах в горных условиях и обладающей повышенной устойчивостью по опрокидыванию, является одной из основных задач.

Двигаясь по склону, колесная машина должна сохранять заданное положение, что будет характеризоваться как устойчивость движения.

Одним из важных эксплуатационных показателей движения колесной машины на склоне является поперечная устойчивость, которая характеризует ее способность работать на уклонах без опрокидывания. Обеспечение надежной по устойчивости против опрокидывания колесных машин является важнейшим условием их безопасной работы [2].

По способу опирания движителей на опорную поверхность транспортные средства подразделяются на двухопорные, трехопорные, четырехопорные и т.д. Трехопорные конструкции, к которым также относятся трехколесные мотоциклы, конструктивно выполняются с симметричным расположением задних колес и с асимметричным расположением колес (мотоцикл с коляской). Очевидно, что мотоцикл с симметричным расположением задних колес устойчивее. И даже они менее устойчивы, чем четырехколесные транспортные средства, поскольку ось опрокидывания последних находится дальше от центра тяжести [2].

Трицикл может потерять устойчивость как на горизонтальной плоскости, так и на наклонной плоскости [3]. Поперечная устойчивость при движении трицикла на склоне зависит от многих факторов, обусловленных

как конструктивными, эксплуатационными показателями самой машины, так и рельефом местности и физико-механическими свойствами опорной поверхности в зонах контакта движителей с опорной поверхностью. Они могут вызывать нарушение устойчивости, что сказывается в скольжении колес или опрокидывании колесной машины [4, 5].

Потеря поперечной устойчивости трицикла при движении в поперечном направлении происходит вследствие заноса или опрокидывания. Если вертикаль, проведенная через центр тяжести трицикла, проходит через точку контакта колеса (нижнего) с почвой, то трицикл находится в состоянии неустойчивого равновесия и характеризуется углом наклона опорной поверхности. Очевидно, что статическая поперечная устойчивость трицикла повысится при увеличении расстояния между центрами пятна контакта колес задней оси и недопущении прохождения вектора центра тяжести через критическую точку опрокидывания.

Вопросы оценки поперечной устойчивости трехколесных транспортных средств отражены в трудах отечественных ученых Г.И. Мамити, М.С. Лянова, А.Е. Гагкуева, С.М. Огороднова, С.Х. Плиева и др.

2. Постановка задачи

При нахождении трицикла на поперечном склоне вес трицикла G раскладывается на две составляющие: перпендикулярную опорной поверхности $G \cos \alpha$, которая стремится прижать колеса к опорной поверхности, – параллельную опорной поверхности $G \sin \alpha$, которая стремится опрокинуть транспортное средство (рис.1).

Составляющая силы тяжести трицикла, параллельная опорной поверхности способствует некоторому догрузению колеса нижнего по склону задней оси трицикла и снижению нагрузки с колеса верхнего по склону. Такое воздействие в значительной степени зависит от смещения центра тяжести масс трицикла, угла косогора, боковой силы и т.д. В результате неизбежно деформирование шины, что является следствием возникновения дополнительного крена трицикла в сто-

рону действия составляющей силы тяжести трицикла $G \sin \alpha$. Это, в свою очередь, будет способствовать уменьшению устойчивости. При поперечном крене нижнее по склону колесо трицикла нагружается не только составляющей силой $G \sin \alpha$, но и моментом, вызванным действием этой составляющей. Центр масс трицикла смещается в сторону действия силы $G \sin \alpha$, тем самым уменьшая расстояние от продольной оси трицикла до прямой, соединяющей центры контактов нижнего по склону колеса задней оси трицикла и переднего колеса. В таком случае момент опрокидывания будет возрастать по отношению к восстанавливающему моменту, что способствует возрастанию вероятности опрокидывания.

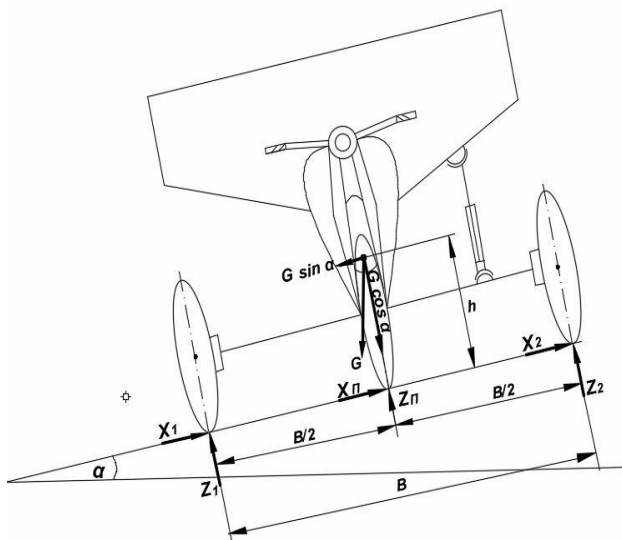


Рис. 1. Схема действия сил и реакций, приложенных к трициклу без стабилизации остова при движении в поперечном направлении склона

При движении трицикла в поперечном направлении склона составляющей силы трицикла $G \sin \alpha$ на плече h будет дополнительно создаваться момент, способствующий нарушению устойчивости трицикла против опрокидывания (рис. 1).

Момент силы, который стремится нарушить устойчивость и опрокинуть трицикл на наклонной плоскости является опрокидывающим моментом, равным:

$$M_{оп} = hG \sin \alpha, \quad (1)$$

где h – расположение центра масс по нормали от опорной поверхности.

Момент составляющей веса трицикла $G \cos \alpha$, который направлен на повышение устойчивости трицикла, является восстанавливающим моментом, создаваемый действием этой силы на расстоянии от точки центра пятна контакта колеса до плоскости, проходящей через центр тяжести по нормали к опорной поверхности. Для рассматриваемой схемы трицикла (рис.1), восстанавливающий момент равен:

$$M_B = B/2 \cdot G \cos \alpha, \quad (2)$$

где B – колея трицикла.

Важную роль против опрокидывания трицикла на склоне играют плечо приложения веса трицикла и плечо приложения составляющей веса трицикла $G \sin \alpha$ (рис. 2). Особое значение имеет расположения центра тяжести масс трицикла. При движении трицикла в поперечном направлении склонов необходимо рассмотреть возможность перемещения центра масс трицикла в сторону возвышенности склона как один из методов, способствующих обеспечению безопасного движение колесных машин на горных склонах. Так, при возможности смещения центра масс трицикла будет увеличиваться плечо восстанавливающего момента и способствовать повышению устойчивости против опрокидывания на склонах (рис. 3) [6].

На рис. 2 и 3 используются следующие обозначения: β - угол между осью симметрии и осью опрокидывания; $n = a \cdot \sin \beta$ – плечо приложения нормальной к опорной поверхности составляющей веса трицикла; h' – плечо приложения параллельной к опорной поверхности составляющей веса трицикла; a – расстояние от центра тяжести трицикла до передней оси; b – расстояние от центра тяжести до задней оси трицикла; L – база трицикла; Z_1, X_1 – реакции, действующие на заднее нижнее колесо; Z_2, X_2 – реакции, действующие на заднее верхнее колесо; Z_n, X_n – реакции, действующие на переднее колесо; d – смещение центра масс трицикла от оси симметрии в сторону возвышенности косогора.

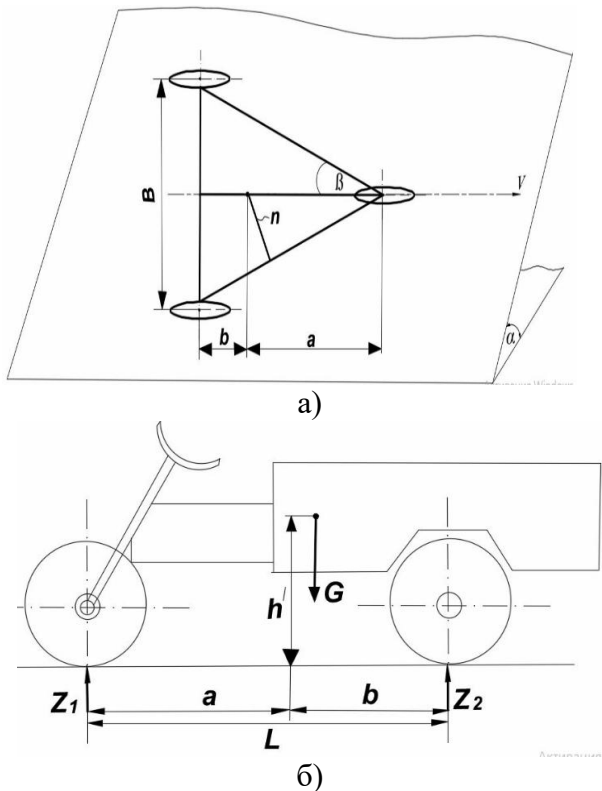


Рис. 2. Схема к определению плеч приложения составляющих веса трицикла для случая движения без наклона остова: а - нормальной; б - параллельной

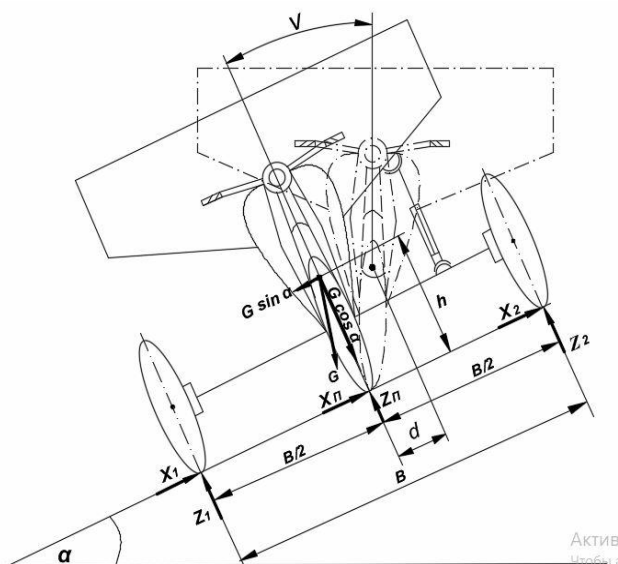


Рис. 3. Схема сил и реакций, действующих на трицикл со стабилизацией остова при движении в поперечном направлении склона

Изменения направления вектора центра тяжести трицикла, изменения величины плеча действия веса трицикла и, таким образом, изменения восстанавливающего момента

можно достичь конструктивно, применив стабилизацию остова трицикла с возможностью сохранения его вертикальности.

Задачей исследования является повышение устойчивости трицикла против опрокидывания при пребывании и прямолинейном движении по косогорам за счет смещения центра масс трицикла от продольной оси в сторону возвышенности склона. Достичь перемещения центра масс трицикла можно наклоном остова в сторону возвышенности склона относительно заднего моста в перпендикулярной относительно направления движения плоскости (рис. 3). При наклоне остова центр масс трицикла будет смещаться в сторону возвышенности склона, тем самым увеличивая расстояние от оси симметрии трицикла до прямой, соединяющей центры контактов колеса нижнего по склону. В таком случае восстанавливающий момент будет возрастать по отношению к опрокидывающему моменту, что будет способствовать увеличению устойчивости против опрокидывания [7-8].

3. Результаты и анализ математического исследования

Для предотвращения опрокидывания трицикла при пребывании или прямолинейном движении по косогору должно выполняться условие:

$$G \sin \alpha \cdot h \leq G \cos \alpha \cdot a \sin \beta, \quad (3)$$

Таким образом, если брать за основу необходимые конструктивные данные исследуемого объекта ($a = 1.53$ м; $G = 3.43$ кН; $h = 0.73$ м; радиус переднего колеса $r_1 = 0.265$ м; радиус заднего колеса $r_2 = 0.225$ м), то условия недопущения опрокидывания трицикла при движении по косогору будет соблюдаться на склонах крутизной до 29° .

Если учитывать смещение центра масс трицикла в сторону возвышенности склона, то условие (1) примет вид [2]:

$$G(h - h_0) \sin \nu \cdot \cos \alpha \leq G n' \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где h_0 – высота расположения оси наклона остова; ν – наклон остова трицикла; n' – плечо

чо приложения нормальной к опорной поверхности составляющей веса трицикла в случае, если остов трицикла наклонен в сторону возвышенности склона.

Если остов трицикла наклонен на угол ν в сторону возвышенности склона, промежуточные параметры примут следующие значения:

$$h_0 = (r_2 a + r_1 b \cos \nu) / L ; \quad (5)$$

$$d = (h - h_0) \sin \nu ; \quad (6)$$

$$\xi = r_1 \cdot \sin \nu / \sqrt{(B/2)^2 + L^2} ; \quad (7)$$

$$n = (d + atg\beta) \cdot \cos(\beta - \xi) + b \cdot \sin \xi / \cos \beta , \quad (8)$$

где ξ - угол, соответствующий перемещению центра пятна контакта шины [2].

Минимальное плечо приложения веса трицикла относительно оси опрокидывания получим в случае, когда кузов не наклонен в сторону возвышенности склона (рис. 2). Наклон остова трицикла в сторону возвышенности оправдан, так как центр масс трицикла расположен выше оси наклона кузова. В случае, когда центр масс трицикла выше оси наклона кузова, при наклоне остова в сторону возвышенности склона произойдет смещение центра масс в эту же сторону, что будет содействовать большей устойчивости.

Трицикл без стабилизации остова может без опрокидывания находиться и двигаться прямолинейно на склонах крутизной до 29° , а при смещении центра масс трицикла d от продольной оси в сторону возвышенности склона (т.е. наклона остова в сторону возвышенности на угол ν) трицикл может без опрокидывания находиться и двигаться прямолинейно на склонах крутизной более 29° .

Таким образом, за счет смещения центра масс трицикла в сторону возвышенности склона можно достичь повышения устойчивости трицикла против опрокидывания при нахождении на склоне или прямолинейном движении.

4. Результаты и анализ имитационного моделирования движения трицикла на косогоре

Объектом исследований является опытный трицикл с изменяемой геометрией кон-

струкции. За основу были взяты характеристики трицикла XY250ZH производства КНР с возможностью наклона переднего управляемого колеса и грузовой платформы (остова) трицикла относительно ведущего моста влево и вправо [9].

В ходе проведения моделирования определялись критические углы косогора при движении трицикла по склону, а также возможность влияния на повышение устойчивости трицикла против опрокидывания путем стабилизации остова.

Для определения критического угла опрокидывания трицикла в программе «Универсальный механизм» проводилось имитационное моделирование движения трицикла на склонах крутизной 25° и 27° (для коэффициента сцепления $\varphi = 0.4$). Определялись момент отрыва колеса от опорной поверхности и критический угол косогора, при котором происходит опрокидывание трицикла, а также возможность влияния стабилизации остова на устойчивость против опрокидывания.

Для моделирования курсового движения записывались:

- пройденное расстояние по оси X , м;
- отклонение от заданного курса движения по оси Y , м.

На представленных ниже рисунках изображены физическая модель трицикла, графики отклонения модели от горизонтали склона и графики траектории опрокидывания трицикла.

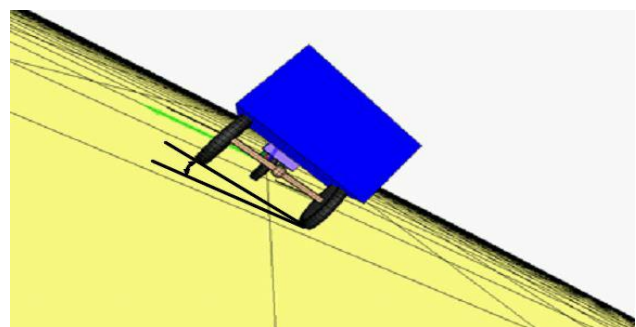


Рис. 4. Неустойчивое движение трицикла на склоне 25° с моментами отрыва колеса от опорной поверхности

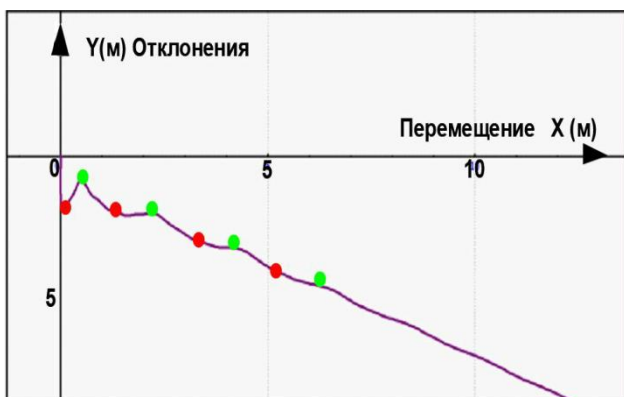


Рис. 5. График неустойчивого движения трицикла на склоне 25° с моментами отрыва колеса от опорной поверхности (● – отрыв верхнего по склону колеса задней оси от опорной поверхности; ● – возвращение верхнего по склону колеса задней оси на опорную поверхность)

На рис. 4 модель трицикла движется на протяжении 50 м вдоль заданной горизонтали имитируемого склона крутизной 25° . В начале моделирования появляется нестабильное движение трицикла с отрывом верхнего по склону колеса задней оси и возвращением обратно на опорную поверхность. После чего (рис. 5), через 7...8 м движение нормализуется и трицикл движется с существенным отклонением от заданного курса движения вниз по склону.

На рис. 6, 7 приводятся результаты моделирования движения трицикла на склоне крутизной 27° . Они показали, что после начала движения трицикл находится в состоянии неустойчивого равновесия, которое приводит к отрыву верхнего по склону колеса задней оси от опорной поверхности и через примерно 1 м наступает опрокидывание транспортного средства. На рис. 8 приведен график траектории опрокидывания трицикла.

При движении трицикла на склоне возникает опасность потери поперечной устойчивости. Движение поперек склона вызывает соответствующий углу склона боковой крен, вследствие чего возникает боковая сила, которая перераспределяет нагрузку между правыми и левыми опорными элементами ходовой части и может привести к поперечному опрокидыванию [10].

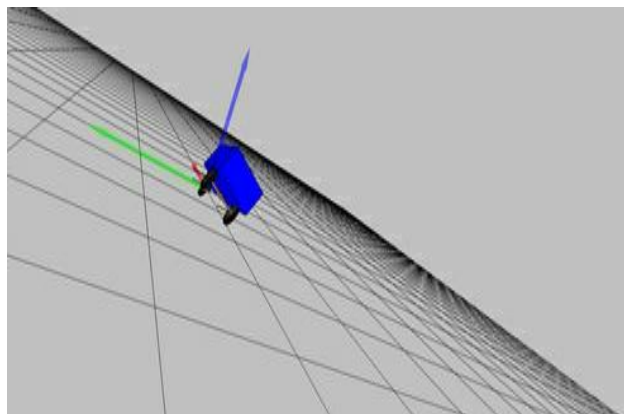


Рис. 6. Момент отрыва колеса трицикла от опорной поверхности имитируемого склона крутизной 27°

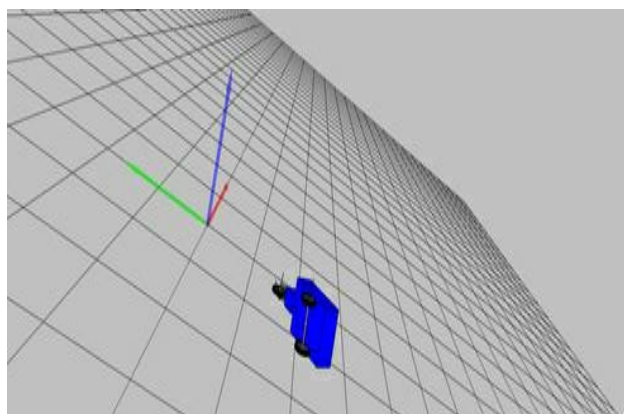


Рис. 7. Поперечное опрокидывание трицикла без стабилизации остова на склоне крутизной 27°

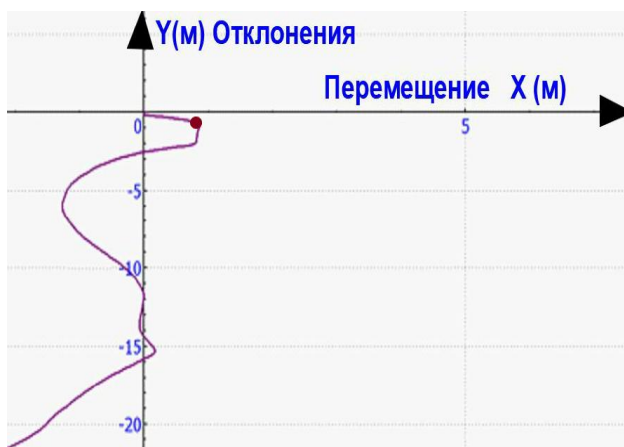


Рис. 8. График траектории опрокидывания трицикла на склоне крутизной 27° (● - начало опрокидывания трицикла)

Проведенное моделирование показало эффективность стабилизации остова трицикла на склоне с целью повышения его устойчивости против опрокидывания. При сохра-



Рис. 9. График траектории движения трицикла с сохранением вертикальности остова на склоне крутизны более 27° без опрокидывания

нении вертикальности остова трицикла и смещении центра масс трицикла в сторону возвышенности склона объект может находиться и двигаться без поперечного опрокидывания на склонах более 27° (рис. 9).

Список литературы

1. Мамити Г.И., Льянов М.С., Гутиев Э.К., Плиев С.Х. Эксплуатационные условия движения колесной машины в горной местности // Известия Горского ГАУ. 2007. № 44. Т.2. С. 133-134.
2. Мамити Г.И., Льянов М.С. Устойчивость трициклов по заносу и опрокидыванию // Автомобильная промышленность. 2008. № 9. С. 22-24.
3. Льянов М.С. Улучшение эксплуатационных свойств колесных тракторов за счет повышения их курсовой устойчивости на склонах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Льянов Марат Савкузович. Л.-Пушкин, 1991. 201 с.
4. Льянов М.С., Пицхелаури Ш.Н., Токарев В.А. Устойчивость трицикла против опрокидывания // Вестник научных трудов молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет». Владикавказ. 2018. №55. С. 167-168.

5. Заключение

Были исследованы процессы движения трицикла на склонах различной крутизны с различным углом наклона остова.

С увеличением угла крутизны косогора, опрокидывающий момент будет возрастать по отношению к восстанавливающему моменту, что будет способствовать нарушению устойчивости трицикла против опрокидывания на косогорах.

Исследования показали, что повышение устойчивости трицикла против опрокидывания при движении по склонам в поперечном направлении можно достичь смещением центра масс трицикла от продольной оси в сторону возвышенности склона, т.е. наклоном остова в сторону возвышенности склона относительно заднего моста в перпендикулярной относительно направления движения плоскости. Такое изменение параметров способствует повышению устойчивости против опрокидывания на склоне, так как восстанавливающий момент будет возрастать по отношению опрокидывающему моменту [10].

References

1. Mamiti G.I., Llanov M.S., Pliev S.H., Gutiev E.K. Operating conditions of a wheeled vehicle in a mountainous area. *Izvestia Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, nauchno teoreticheski zhurnal*, Vol. 45, pp. 133-134. (In Russian)
2. Mamiti G.I., Lianov M.S. The stability of the trike to skid and rollover. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2008, No. 9, pp. 22-24. (In Russian)
3. Llanov M.S. Improving the performance of wheeled tractors at the expense of increase of their stability on the slopes. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Leningrad-Pushkin, 1991. 201p. (In Russian)
4. Llanov M.S., Pitskhelauri Sh.N., Tokarev V.A. Stability of the tricycle against overturning. *Vestnik nauchnykh trudov molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, Vol. 55, No.3, pp. 167-168. (In Russian)

5. Пицхелаури Ш.Н., Повышения курсовой устойчивости трицикла за счет изменяемой геометрии конструкции // Приоритетные научные исследования и инновационные технологии в АПК: наука-производству: Мат. нац. научно-практ. конф., Волгоградский государственный аграрный университет. Волгоград, 2019. С. 165-172.

6. Льянов М.С., Токарев В.А., Пицхелаури Ш.Н., Бидеева Е.В. Особенности компоновочных схем колёсных машин со стабилизацией остова для работы на склонах // Мат. всеросс. научно-практ. конф., Горский ГАУ. Владикавказ, 2017. С. 275-278.

7. Мамити Г.И., Льянов Б.М., Цаллагов М.С. Расположение центра масс и продольное опрокидывание мотоцикла // Автомобильная промышленность. 2001. № 4. С. 24-25.

8. Льянов М.С., Пицхелаури Ш.Н., Токарев В.А., Кокшаров С.А., Калаев Р.И. Влияние конструктивных параметров транспортного средства на его устойчивость // Вестник научных трудов молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов Горского государственного аграрного университета. 2019. № 56. С. 123-126.

9. Льянов М.С., Гутиев Э.К., Зокоев А.О. Трицикл с изменяемой геометрией конструкции – основа создания специальной системы активной безопасности // Известия Горского ГАУ. 2014. № 51. Т. 3. С. 179-183.

10. Льянов, М.С., Гутиев Э.К., Зокоев А.О. Устойчивость трицикла с наклоняющимся кузовом // Автомобильная промышленность. 2015. № 4. С. 23-24.

5. Pitskhelauri Sh.N. Materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Prioritetnye nauchnye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v APK: nauka proizvodstvu". Volgograd, 2019, pp.165-172. (In Russian)

6. Llanov M.S., Tokarev V.A., Pitskhelauri Sh.N., Bideeva E.V. Materialy vserossiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Gorskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. Vladikavkaz, 2017, pp.275-278. (In Russian)

7. Mamiti G.I., Llanov M.S., Tsallagov B.M. Location of the center of mass and longitudinal rollover of the motorcycle. *Avtomobilnia promyshlennost*, 2001, No. 4, pp. 24-25. (In Russian)

8. Llanov M.S., Pitskhelauri Sh.N., Tokarev V.A., Koksharov S.A., Kalayev R.I. Influence of the vehicle's structural parameters on its stability. *Vestnik nauchnykh trudov molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, No. 56, pp.123-126. (In Russian)

9. Llanov M.S., Gutiev E.K., Zokoev A.O. A tricycle with a variable design geometry is the basis for creating a special active safety system. *Izvestia Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, Vol. 3, No. 51, pp. 179-183. (In Russian)

10. Llanov M.S., Gutiev E.K., Zokoev A.O. Tilt body tricycle stability. *Avtomobilnia promyshlennost*, 2015, No. 4, pp. 23-24. (In Russian)