

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Научная статья

УДК 630*36

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>

EDN: NAFMUI

Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне

А. В. Лагерева, А. В. Макулина ✉

Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского,

Российская Федерация, 241036, Брянск, ул. Бежицкая, 14

inno-bgu@yandex.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Расширение сферы безопасной механизированной лесозаготовки требует адаптации лесохозяйственной техники к эксплуатации лесосек с большими углами наклона на основе разработки новых конструктивных систем, машин и механизмов для решения указанной проблемы. Однако вопросы проектирования и моделирования рабочих процессов машин для лесозаготовки в условиях сильно пересечённой холмистой местности с крутыми склонами в настоящее время исследованы недостаточно. Известные исследования носят, в основном, экспериментальный характер. *Целью* исследования является разработка динамической математической модели канатной анкерной системы как структурного компонента безопасности колёсного харвестера. *Объекты и методы* исследования. Объект – канатная анкерная система. Для построения системы дифференциальных уравнений движения центров масс основных конструктивных компонентов харвестера и анкерной системы использовался метод Лагранжа II рода. *Результаты.* Применительно к трёхосному харвестеру с колёсной формулой 6К6 выполнены расчёты колебательных процессов динамических параметров, определяющих нагруженность анкерной системы и безопасность эксплуатации харвестера в процессе манипулирования сортиментом. *Выводы.* Динамическая модель позволяет учесть и провести системный анализ большого числа количественных конструктивных и режимных параметров харвестера и физико-механических свойств грунтов, которые характеризуют динамическое поведение и нагруженность как структурных элементов анкерной системы, так и самого харвестера. Перспективным направлением её дальнейшего использования является разработка практических рекомендаций по проектированию эффективных и надёжных канатных анкерных систем.

Ключевые слова: лесозаготовка на склоне; колёсный харвестер; динамическая модель; динамические параметры

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Лагерева А. В., Макулина А. В. Моделирование динамической нагруженности анкерного каната при работе харвестера на крутом склоне // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2025. № 1 (65). С. 61–72. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>; EDN: NAFMUI

Введение

В современных условиях в связи с истощением традиционных источников отмечается повышение сложности добычи природных ресурсов. Это относится не

только к добыче энергоносителей (газ, нефть, уголь), но и к заготовке леса [1]. В настоящее время значительные территории лесозаготовки расположены в горной и холмистой местности, характеризующейся

сложным природным рельефом с наличием склонов повышенной крутизны [2, 3]. Такая ситуация характерна как для проведения лесозаготовительных работ на территории Российской Федерации [4], так и стран ближнего и дальнего зарубежья [5].

Механизированная заготовка древесины на склонах имеет свои очевидные технические и технологические сложности, обусловленные необходимостью комплексного решения двуединой задачи – эффективного проведения лесозаготовительных работ наряду с эффективной защитой экологически уязвимых лесных экосистем и обеспечением безопасности работы персонала лесохозяйственных предприятий [2]. Однако механизированная лесозаготовка на территориях с крутыми склонами в настоящее время имеет достаточно широкое распространение [1, 6]. Для заготовки древесины на таких территориях со сложным рельефом используются харвестеры и форвардеры, оснащённые канатными элементами для закрепления на склонах, позиционирования рабочего органа и вывоза древесины [3, 7].

По данным исследования [8], в котором был дан сравнительный анализ природных условий, характерных для приоритетного использования механизированной и ручной лесозаготовки на горных территориях, даже при наличии достаточно крутых склонов и необходимости применения специальных анкерных устройств и систем для удержания лесных машин от самопроизвольного перемещения под действием собственного веса, механизированная лесозаготовка оказывается более предпочтительной. Тем не менее, она, как правило, ограничивается участками с умеренным уклоном, при котором либо полностью отсутствует необходимость в дополнительной анкеровке работающей лесозаготовительной машины, либо уклон незначительно превышает допустимое значение и требуется анкеровка со сравнительно небольшой нагрузочной способностью [9]. По имеющимся опытным данным [10, 11],

допустимое значение уклона опорной поверхности зависит от ряда факторов, таких как категория грунта, степень его влажности и уплотнения, наличие и состав почвенной растительности, технические характеристики шасси и вес машины. Ручная лесозаготовка оказывается экономически оправданной либо при весьма больших углах наклона опорной поверхности, которые пока превышают технические возможности современных машин для лесозаготовки, либо при выраженном скалистом рельефе местности.

По мнению ряда исследователей [12], перспективным направлением дальнейшего развития механизированной лесозаготовки в горных районах является её расширение на территории со склонами большей крутизны, так это оказывается целесообразным мероприятием как с точки зрения снижения экономических затрат на добычу древесины и её транспортирование до конечного потребителя, так и с точки зрения снижения уровня травматизма среди рабочих-лесорубов [13]. Указанная задача предусматривает модернизацию современных конструкций лесохозяйственной техники с целью их адаптации к более тяжёлым условиям эксплуатации. Условием её реализации является проведение широкого комплекса эмпирических и теоретических исследований, результаты которых формируют научный фундамент для последующей разработки новых специализированных машин и систем [5].

С целью удержания харвестеров при работе на крутых склонах, величина уклона которых превышает допустимое значение по условию самопроизвольного перемещения машины, в настоящее время используются канатные анкерные системы – статические (естественный анкер – дерево или пень с требуемыми характеристиками прочности и сопротивлением выкорчёвыванию [14]) и динамические (искусственный анкер – мобильная техника, например, трактор [15]).

Актуальность исследования обусловлена тем, что вопросы проектирования и мо-

делирования рабочих процессов машин, снабжённых канатными анкерными системами для лесозаготовки в условиях сильно пересечённой холмистой местности с крутыми склонами, в настоящее время исследованы недостаточно. Известные исследования основаны преимущественно на экспериментальном подходе путём регистрации статического или динамического поведения параметров анкерной системы в процессе работы харвестера в натурных условиях эксплуатации [16, 17]. Однако для создания адекватных методов проектирования анкерных систем одних экспериментальных данных оказывается недостаточно, так как они по своей природе носят ограниченный, частный характер и не дают необходимой всесторонней информации о направленности и степени индивидуального или коллективного влияния тех конструктивных и режимных параметров, которые формируют нагруженность анкерной системы работающего харвестера и, в конечном итоге, определяют безопасность проведения лесозаготовки на крутых склонах. Указанная методическая ограниченность экспериментальных исследований может быть преодолена только на основе использования современных методов математического моделирования в сочетании с высокопроизводительными компьютерами, что позволяет создавать сложные динамические модели рабочих процессов с учётом большого числа значимых количественных параметров.

Целью исследования является разработка динамической математической модели канатной анкерной системы как структурного компонента безопасности колёсного харвестера.

Объект и методы исследования

Объект – канатная анкерная система, включающая следующие основные структурные элементы: установленную на несущей раме харвестера анкерную лебёдку, анкерный канат переменной длины и анкерное дерево.

Для построения системы дифференциальных уравнений движения центров масс основных конструктивных компонентов харвестера и анкерной системы использовался метод Лагранжа II рода. Для интегрирования системы из 70-ти дифференциальных уравнений I порядка с учётом начальных условий использовался метод Рунге–Кутты IV порядка.

Математическая модель анкерного каната

При работе анкерной системы харвестера наблюдается естественное провисание осевой линии анкерного каната (рис. 1) в пролёте длиной L_r между точкой K его крепления к анкерной лебёдке и точкой L крепления к анкерному дереву. С учётом исследований [18, 19] применительно к ситуации расположения харвестера на крутом склоне, в зависимости от перепада высот расположения точек K и L и осевого усилия предварительного натяжения анкерного каната $S_{r,0}$, может реализовываться одна из двух форм естественного провисания:

форма I – максимальное провисание каната наблюдается в сечении, расположенном в пролёте между опорными точками K и L на расстоянии a и b этих точек (рис. 1, а);

форма II – максимальное провисание каната находится за пределами пролёта (рис. 1, б).

Расстояния a и b выражаются зависимостями:

$$a = \frac{1}{2} \left(L_r \cos \alpha_s - \frac{S_{r,0}}{g_r} \cdot \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right); \quad (1)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(L_r \cos \alpha_s + \frac{S_{r,0}}{g_r} \cdot \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right), \quad (2)$$

где $S_{r,0}$ – продольное усилие натяжения анкерного каната [12], Н.

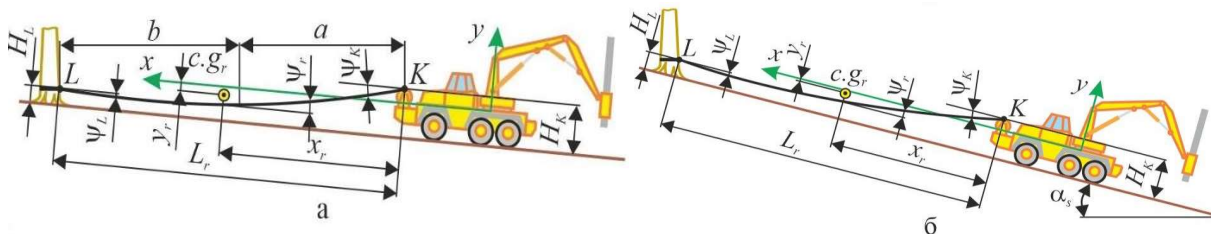


Рис. 1. Возможные формы естественного провисания анкерного каната: а – форма I; б – форма II
Fig. 1. Possible forms of natural sagging of the anchor rope: a – form I; b – form II

Между осевым усилием предварительного натяжения анкерного каната S_{r0} и продольным усилием $S_{r,l0}$ существует однозначное соответствие [20]. При известном значении S_{r0} , которое может быть определено динамометром вблизи точки сбегания каната с обечайки анкерной лебёдки (точки K), значение $S_{r,l0}$ находится решением нелинейного уравнения:

– при форме I провисания каната

$$S_{r0} \cos \left[\arctg \left(\frac{g_r a}{S_{r,l0}} \right) \right] - S_{r,l0} = 0; \quad (3)$$

– при форме II провисания каната

$$S_{r0} \cos \left[\arctg \left(\frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{S_{r,l0}} \right) \right] - S_{r,l0} = 0. \quad (4)$$

Так как форма провисания каната заранее неизвестна, требуется использование обоих указанных нелинейных уравнений с дальнейшим определением реализуемой для вычисленных $S_{r,l0}$ формы провисания. Граничный угол наклона поверхности грунта, определяющий реализующуюся форму провисания анкерного каната, с учётом [21] выражается зависимостью:

$$[\alpha_s]_t = \arctg \left(\frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{S_{r,l0}} \right). \quad (5)$$

При $[\alpha_s]_t > \alpha_s$ реализуется форма I, при $[\alpha_s]_t < \alpha_s$ – форма II.

Форма I характеризуется большим провисанием анкерного каната, чем форма II, поэтому она определяет минимально возможное усилие предварительного натяжения анкерного каната, которое необходимо создать с помощью анкерной лебёдки, чтобы обеспечить гарантированное расположение каната над опорной поверхностью грунта по всей длине пролёта длиной L_r без их соприкосновения.

Расчётная схема, предназначенная для определения минимального продольного усилия натяжения анкерного каната $[S_{r,l}]_{\min}$, которое обеспечивает его естественное провисание в статическом состоянии (т. е. без учёта вертикальных колебаний анкерного каната в процессе работы харвестера), приведена на рис. 2.

Искомое усилие $[S_{r,l}]_{\min}$ находится из условия

$$H_K - \frac{g_r a^2}{[S_{r,l}]_{\min}} = a \operatorname{tg} \alpha_s + [H_r] \quad (6)$$

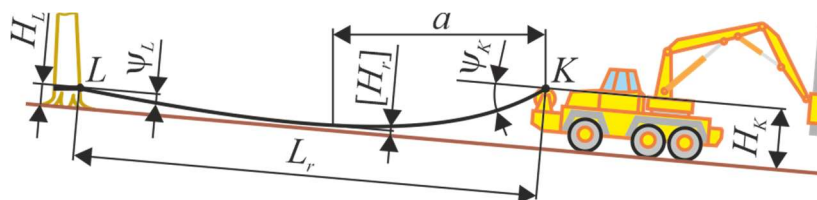


Рис. 2. Расчётная схема для определения минимального усилия натяжения анкерного каната
Fig. 2. Calculation scheme for determining the minimum tension force of the anchor rope

путём решения нелинейного уравнения

$$4(H_K - [H_r]) - \left(L_r \cos \alpha_s \frac{[S_{r,l}]_{\min}}{g_r} \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right) \times \left[\frac{g_r}{[S_{r,l}]_{\min}} \left(L_r \cos \alpha_s \frac{[S_{r,l}]_{\min}}{g_r} \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right) + 2tg\alpha_s \right] = 0, \quad (7)$$

где $[H_r]$ – минимально допустимое приближение анкерного каната к поверхности грунта, м.

Тогда минимальное осевое усилие натяжения анкерного каната $[S_r]_{\min}$ в точке K будет составлять

$$[S_r]_{\min} = [S_{r,l}]_{\min} \cos^{-1} \left[\arctg \left(\frac{g_r a}{[S_{r,l}]_{\min}} \right) \right]. \quad (8)$$

Принимаемые при работе харвестера осевое и продольное усилия натяжения анкерного каната должны удовлетворять условиям

$$S_{r0} > [S_r]_{\min}; \quad (9)$$

$$S_{r,l0} > [S_{r,l}]_{\min}. \quad (10)$$

Если при работе харвестера реализуется форма I естественного провисания анкерного каната, то углы наклона его осевой линии в характерных точках составляют:

– в точке K крепления к анкерной лебёдке

$$\psi_K = \arctg \left[\frac{g_r}{2S_{r,l0}} \left(L_r \cos \alpha_s - \frac{S_{r,l0}}{g_r} \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right) \right] - \alpha_s; \quad (11)$$

– в точке L крепления к анкерному дереву

$$\psi_L = \arctg \left[\frac{g_r}{2S_{r,l0}} \left(L_r \cos \alpha_s + \frac{S_{r,l0}}{g_r} \frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} \right) \right] - \alpha_s. \quad (12)$$

Если при работе харвестера реализуется форма II естественного провисания анкерного каната, то углы наклона его осевой линии в характерных точках составляют:

– в точке K крепления к анкерной лебёдке

$$\psi_K = \arctg \left(\frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} - \frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l0}} \right) - \alpha_s; \quad (13)$$

– в точке L крепления к анкерному дереву

$$\psi_L = \arctg \left(\frac{L_r \sin \alpha_s + H_L - H_K}{L_r \cos \alpha_s} + \frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l0}} \right) - \alpha_s. \quad (14)$$

Коэффициент естественного провисания анкерного каната, характеризующий увеличение его длины в пролёте, определяется зависимостями:

– при форме I провисания каната

$$k_r = a \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r a}{2S_{r,l0}} \right)^2 \right] + b \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r b}{2S_{r,l0}} \right)^2 \right]; \quad (15)$$

– при форме II провисания каната

$$k_r = 1 + \frac{1}{6} \left(\frac{g_r L_r \cos \alpha_s}{2S_{r,l0}} \right)^2. \quad (16)$$

В произвольный момент времени τ осевое усилие натяжения анкерного каната $S_r(\tau)$ определяется соотношением

$$S_r(\tau) = S_{r0} + c_r \left[\frac{q_{35}(\tau)}{\cos \psi_L} - \frac{q_{32}(\tau)}{\cos \psi_K} \right]. \quad (17)$$

Для определения пространственного положения центра масс анкерного каната используется расчётная схема, показанная на рис. 3. По аналогии с алгоритмом определения центра тяжести однородной нити постоянного поперечного сечения и погонного веса [22] анкерный канат по всей длине разобьём на I последовательно расположенных участков.

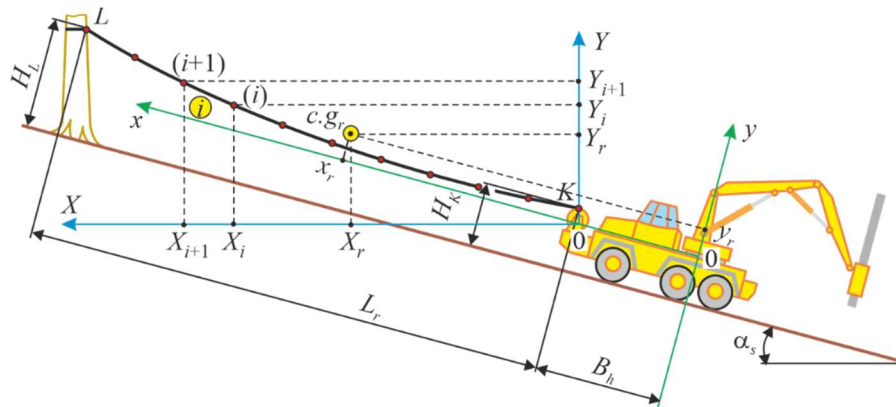


Рис. 3. Расчётная схема для определения пространственного положения центра масс анкерного каната
Fig. 3. Calculation scheme for determining the spatial position of the mass center of the anchor rope

Положение произвольного i -го характеризуется координатами в системе координат XOY : левая граница в точке (i) – $(X_i; Y_i)$, правая граница в точке $(i+1)$ – $(X_{i+1}; Y_{i+1})$. Координаты указанных граничных точек определяются с учётом естественного провисания анкерного каната, испытывающего растяжение усилием натяжения каната S_r :

$$X_i = (i-1)\Delta X; \quad (18)$$

$$X_{i+1} = i\Delta X = X_i + \Delta X; \quad (19)$$

– при форме I естественного провисания анкерного каната

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} - \frac{g_r X_i^2}{S_r}, \text{ если } X_i \leq a; \quad (20)$$

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} + \frac{g_r X_i (X_i - 2a)}{S_r}, \text{ если } X_i > a; \quad (21)$$

– при форме II естественного провисания анкерного каната

$$Y_i = \frac{H_K}{\cos \alpha_s} + \left[tg \alpha_s - \frac{g_r}{2S_r} (L_r \cos \alpha_s - X_i) \right] X_i, \quad (22)$$

где ΔX – шаг разбиения анкерного каната на отдельные участки по координатной оси X , м.

Координаты центра масс анкерного каната в системе координат XOY определяются зависимостями:

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=I} (X_i + 0,5\Delta X) \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{i=I} \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}; \quad (23)$$

$$Y_r = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{i=I} (Y_i + Y_{i+1}) \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{\sum_{i=1}^{i=I} \sqrt{\Delta X^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}, \quad (24)$$

а в системе координат харвестера xOy – зависимостями:

$$x_r = (Y_r - X_r tg \alpha_s - H_K) \sin \alpha_s + \frac{X_r}{\cos \alpha_s} + B_h; \quad (25)$$

$$y_r = (Y_r - X_r tg \alpha_s) \cos \alpha_s. \quad (26)$$

Результаты и их обсуждение

Представленная выше математическая модель анкерного каната была включена в качестве самостоятельного компонента в общую структуру комплексной динамической 12-ти массовой модели шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» с 35-ю степенями свободы [23]. Применительно к трёхосному колёсному харвестеру с колёсной формулой 6К6 и неразрезной несущей рамой была реализована в компьютерной программе «Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне» [24].

Результатом выполнения компьютерной программы является нахождение с постоянным шагом $\Delta \tau$ законов изменения во

времени динамических параметров указанной шестикомпонентной системы на протяжении временного интервала технологической операции манипулирования сортиментом. В число определяемых в дискретные моменты времени динамических параметров входят: пространственное положение, скорость и ускорение 35-ти перемещений и углов поворота характерных точек конструкции харвестера, манипулятора, харвестерной головки и анкерной системы, усилие натяжения и напряжение растяжения анкерного каната, коэффициенты запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию и запаса работоспособности харвестера по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево и др.

С целью анализа направленности и степени влияния основных технических характеристик харвестера и анкерной системы на ключевые динамические параметры моделируемой шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» в качестве базового варианта был принят вариант харвестера с колёсной формулой 6К6, в качестве прототипа которого использовался колёсный харвестер Амкодор 2562 [25].

Было принято, что харвестер эксплуатируется на склоне крутизной 40° , грунт которого соответствует коэффициенту сопротивления скольжению заторможенных колёс харвестера, равному 0,4. В этом слу-

чае допустимое значение уклона, при котором не требуется анкеровка, составляет не более $28,6^\circ$ (теоретически), а с учётом 20 %-го запаса безопасности – не более $22,1^\circ$. Таким образом, анкерная система имеет существенный уровень динамической нагруженности: осевое усилие предварительного натяжения анкерного каната типа ЛК-Р ГОСТ 2688-80 маркировочной группы 1960 МПа с разрывным усилием 137 кН и диаметром 15 мм составляет 50,2 кН. Рассматривался один цикл работы четырёхзвенного манипулятора по перемещению сортиmenta весом 3 кН от места спиливания дерева на продольной оси харвестера до места складирования перпендикулярно продольной оси. Продолжительность цикла составляла 8 с, в перемещении сортиmenta участвовали все звенья манипулятора. На рис. 4 показаны графики изменения во времени модуля и проекций эксплуатационных сил, действующих на харвестерную головку во время перемещения сортиmenta.

На рис. 5 показана динамика ряда параметров, которые характеризуют динамическую нагруженность канатной анкерной системы в течение интервала времени с максимальным уровнем действующей эксплуатационной нагрузки на харвестерную головку (рис. 4). В связи с малым временным шагом при интегрировании системы дифференциальных уравнений на этом рисунке приведены результаты расчёта временного интервала длительностью 0,05 с.

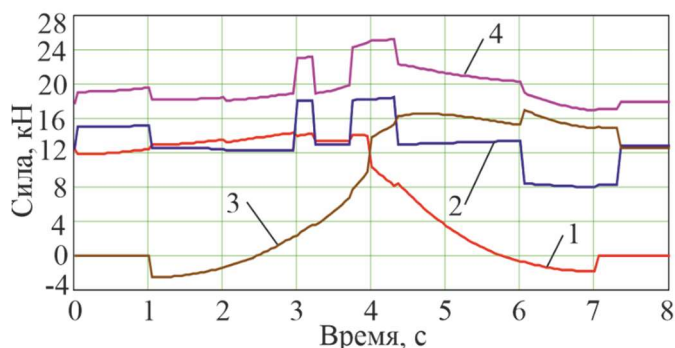


Рис. 4. Графики изменения во времени модуля и проекций сил, действующих на харвестерную головку:

1 – проекция на ось x ; 2 – проекция на ось y ; 3 – проекция на ось z ; 4 – модуль сил

Fig. 4. Graphs of time variation of the module and projections of forces acting on the harvester head:

1 – projection on the x -axis; 2 – projection on the y -axis; 3 – projection on the z -axis; 4 – modulus of forces

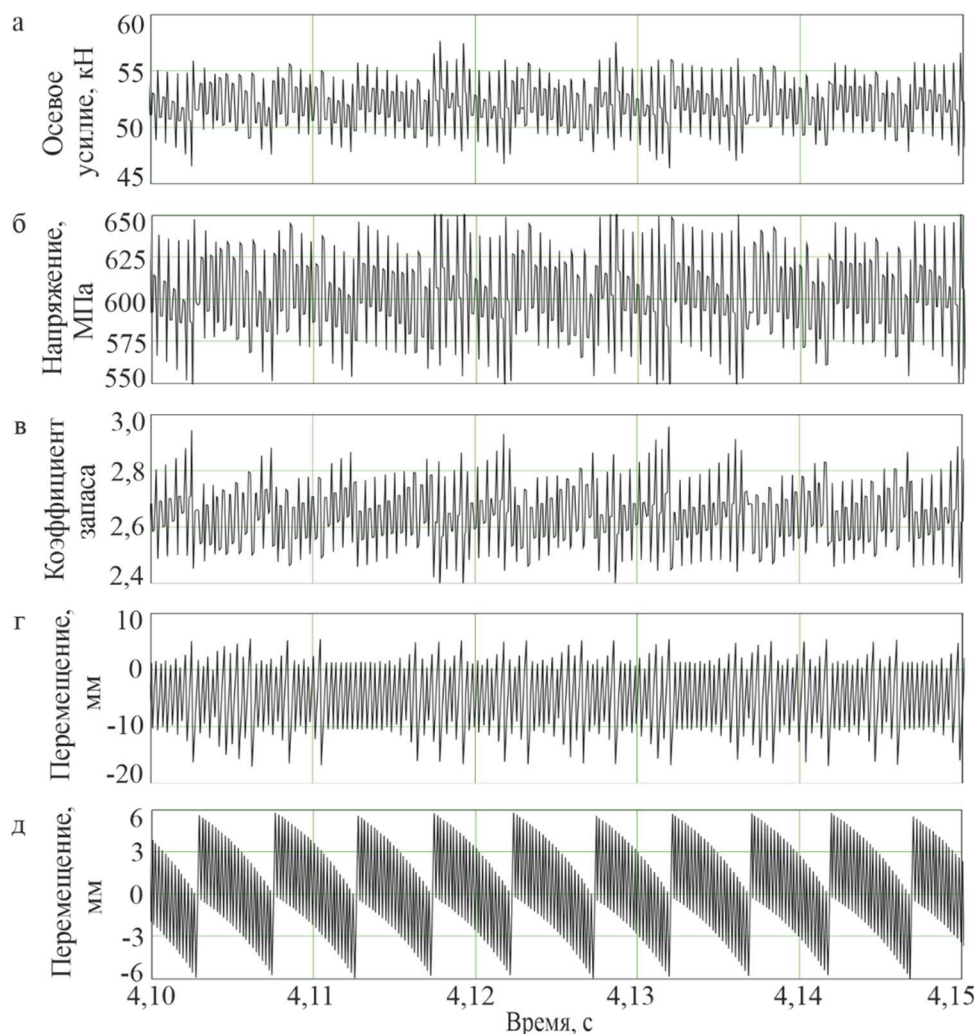


Рис. 5. Динамика параметров нагруженности канатной анкерной системы: а – осевое усилие натяжения анкерного каната; б – напряжение растяжения анкерного каната; в – коэффициент запаса прочности анкерного каната по разрывному усилию; г – перемещение центра масс анкерной лебёдки; д – перемещение центра масс анкерного дерева

Fig. 5. Dynamics of loading parameters of the rope anchor system: а – axial tension force of the anchor rope; б – tension stress of the anchor rope; в – safety margin of the anchor rope by breaking force; д – displacement of the mass center of the anchor winch; е – displacement of the mass center of the anchor tree

Практически анкеровку работающего харвестера необходимо проводить при углах наклона более $16...25^\circ$, что обеспечивает коэффициент безопасности по допустимому углу на уровне $1,2...1,5$. Увеличение угла наклона опорной поверхности требует увеличения предварительного натяжения анкерного каната, определяемого коэффициентом сопротивления скольжению колёс по грунту и весом харвестера. С ростом угла и усилия натяжения изначально регулярный вид колебательного процесса количественных параметров динамической системы становится всё более

нерегулярным с появлением дополнительных промежуточных амплитуд колебаний с меньшими размахами. Диаметр анкерного каната оказывает влияние на динамические параметры самого каната (нагруженность, коэффициенты запаса прочности по разрывному усилию и работоспособности харвестера по критическому опрокидывающему усилию на анкерное дерево) и не влияет на другие параметры анкерной системы и харвестера.

Выводы

Динамическая математическая модель анкерного каната, включённая в общую

структуру комплексной динамической 12-тикомпонентной модели шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт», позволяет учесть и провести системный анализ большого числа количественных конструктивных и режимных параметров харвестера при его работе на крутом склоне и физико-механических свойств грунтов, которые характеризуют динамическое поведение и нагруженность как структурных элементов анкерной системы, так и самого харвестера. Таким образом, на стадиях проектирования и эксплуатации канатных анкерных систем харвестеров возможно количественно оценивать их ключевые

технические характеристики при работе на склонах повышенной крутизны, для которых в обязательном порядке требуется использование специальных систем безопасности. Сформулированные на основе научно обоснованных результатов моделирования динамической шестикомпонентной системы «харвестер – манипулятор – сортимент – анкерная система – анкерное дерево – грунт» рекомендации дают возможность рационального выбора основных технических характеристик анкерной системы, включая выбор типоразмеров анкерных канатов и рациональной величины их натяжения, выбор безопасных размеров анкерных деревьев на этапе эксплуатации харвестера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Can nature conservation and wood production be reconciled in managed forests? A review of driving factors for integrated forest management in Europe / F. Aggestam, A. Konczal, M. Sotirov et al. // *Journal of Environment Management*. 2020. Vol. 268, iss. 9. Art. 110670. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110670
2. Naillon T., Rappin C. Best management and operating practices for steep slope machine logging. Technical Report No.: 98-02-2019. Safety and Health Assessment and Research for Prevention Program. WA: Washington state department of labor & industries, 2019. 46 p.
3. Лесозаготовительные машины для работы на склонах / И. Григорьев, О. Куницкая, С. Рудов и др. // Бюллетень ассоциации Лестех. 2020. № 2 (2). С. 4–9. EDN: ORQYUO
4. Машинная заготовка древесины на горных лесосеках / В. А. Каляшов, Д. Т. Ань, О. И. Григорьева и др. // *ЛесПромИнформ*. 2022. № 5. С. 82–83.
5. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology / A. McEwan, E. Marchi, R. Spinelli et al. // *Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 31, iss. 2. Pp. 339–351. DOI: 10.1007/s11676-019-01019-3
6. Bont L., Heinimann H. R. Optimum geometric layout of a single cable road // *European Journal of Forest Research*. 2012. Vol. 131, iss. 5. Pp. 1439–1448. DOI: 10.1007/s10342-012-0612-y
7. Visser R., Stampfer K. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015. Vol. 36, iss. 2. Pp. 321–331.
8. Assessment of timber faller working conditions in mixed hand and tethered-machine cut harvest units on steep slopes – A case study in western Oregon / M. Pokharel, F. Belart, W. Chung et al. // *International Journal of Forest Engineering*. 2023. Vol. 34, iss. 3. Pp. 408–416. DOI: 10.1080/14942119.2023.2170149
9. Development and benefits of winch-assist harvesting / T. Holzfeind, R. Visser, W. Chung et al. // *Current Forestry Reports*. 2020. Vol. 6, iss. 3-4. Pp. 201–209. DOI: 10.1007/s40725-020-00121-8
10. Kováč J., Remper M., Krilek J. Analysis of the frictional coefficient at the pulling load on the tilted plane // *Acta Facultatis Technicae*. 2011. Vol. 16, iss. 1. Pp. 65–72.
11. Berkett H., Visser R. Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Harvesting Technical Note HTN05-02. Rotorua, NZ: Future Forests Research Ltd, 2012. 8 p.
12. Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions / F. Di Fulvio, M. Acuna, P. Ackerman et al. // *International Journal of Forest Engineering*. 2024. Vol. 35, iss. 2. Pp. 225–250. DOI: 10.1080/14942119.2023.2296789
13. Green P. Insight into the productivity, cost and soil impacts of a cable-assisted harvester forwarder thinning in western Oregon. Corvallis: Oregon State University, 2019. 125 p.
14. Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T. Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood // *International Journal of Forest Engineering*. 2021. Vol. 32, iss. 3. Pp. 202–215. DOI: 10.1080/14942119.2021.1906617
15. The analysis of the new conception transportation cableway system based on the tractor equipment / P. Beňo, J. Krilek, J. Kováč et al. // *FME Transactions*. 2018. Vol. 46, iss. 1. Pp. 17–22. DOI: 10.5937/fmet1801017B

16. Monitoring cable tensile forces of winch-assist harvester and forwarder operations in steep terrain / F. Holzleitner, M. Kastner, K. Stampfer et al. // *Forests*. 2018. Vol. 9, iss. 2. Art. 53. DOI: 10.3390/f9020053
17. Field and laboratory research of the rut development process on forest roads / O. Machuga, A. Shchupak, O. Styranivskiy et al. // *Forests*. 2024. Vol. 15, iss. 1. Art. 74. DOI: 10.3390/f15010074
18. *Лагерева А. В., Лагерева И. А., Таричко В. И.* Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов: монография. Брянск: Брянский государственный университет, 2022. 207 с.
19. *Lagerev A. V., Lagerev I. A.* Design of passenger aerial ropeway for urban environment // *Urban Rail Transit*. 2019. Vol. 5, iss. 1. Pp. 17–28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z; EDN: WUVCOS
20. *Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Шнейдерович Р. М.* Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 616 с.
21. *Лагерева А. В., Лагерева И. А., Таричко В. И.* Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 3. С. 194–210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210; EDN: EVLPWZ
22. *Яблонский А. А.* Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика. М.: Высшая школа, 1977. 430 с.
23. *Лагерева А. В., Лагерева И. А., Макулина А. В.* Динамическая модель харвестера, оснащенного канатной анкерной системой, при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2024. № 3. С. 188–206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206; EDN: HPDZFY
24. Динамика харвестера с анкерным канатом при проведении лесозаготовительных работ на крутом склоне: свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Лагерева И. А., Лагерева А. В., Макулина А. В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2024668708; заявл. 22.07.24; опубл. 09.08.24. Бюл. 8. EDN: LNQHBT
25. *Федоренчик А. С., Герман А. А., Протас П. А.* Лесные машины «Амкодор». Минск: БГТУ, 2013. 240 с.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 03.03.2025

Информация об авторах

ЛАГЕРЕВ Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры профессионально-технологического образования и безопасности жизнедеятельности, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского. Область научных интересов – оптимальное проектирование, моделирование рабочих процессов, анализ динамики и прочности транспортно-технологических машин различного назначения и мобильных канатных систем. Автор 480 научных публикаций, в том числе 27 монографий, 100 патентов и свидетельств РФ на результаты интеллектуальной деятельности. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>; SPIN-код: 6518-8902

МАКУЛИНА Анна Васильевна – ассистент кафедры информатики и прикладной математики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского. Область научных интересов – моделирование рабочих процессов при эксплуатации лесохозяйственных машин на крутых склонах. Автор 50 научных публикаций, в том числе пяти свидетельств РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>; SPIN-код: 7546-0990

Вклад авторов:

Лагерева А.В. – научное руководство исследованием, разработка динамической математической модели, интерпретация и анализ результатов расчётов.

Макулина А.В. – компьютерная реализация динамической математической модели, проведение расчётов, интерпретация и анализ результатов расчётов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*36

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>

EDN: NAFMUI

Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope**A. V. Lagerev, A. V. Makulina** ✉Bryansk State Academician I.G. Petrovski University,
14, Bezhitskaya St., Bryansk, 241036, Russian Federation
inno-bgu@yandex.ru ✉

Abstract. *Introduction.* The expansion of the scope of safe mechanized logging requires adaptation of forestry equipment to operations in cutting areas with large inclination angles, which, in turn, necessitates the development of new design systems, machines, and mechanisms for solving this problem. However, there is a lack of research on designing and modeling work processes for logging machines in rugged hilly terrain with steep slopes. Known studies are mainly of experimental nature. *The purpose of the study* is to create a dynamic mathematical model of a rope anchor system, which is a crucial structural component for the safety of wheeled harvesters. *Objects and methods.* The object of this study is a rope anchor system. The Lagrange method of the second kind was used to construct a system of differential equations for the motion of the mass centers of the main structural components of the harvester and the anchor system. *Results.* In relation to a three-axle harvester with a 6K6 wheel formula, calculations have been performed to determine the oscillatory processes and dynamic parameters that affect the load on the anchor system and the safety of the harvester's operation during sorting. *Conclusion.* The dynamic model makes it possible to take into account and systematically analyze a large number of quantitative design and operational parameters of the harvester, as well as the physical and mechanical properties of the soil, which characterize the dynamic behavior and loading on both the structural elements of the anchor system and the harvester itself. One promising direction for further use of this model is the development of practical recommendations for designing efficient and reliable rope anchor systems.

Keywords: logging on the slope; wheel harvester; dynamic model; dynamic parameters**Funding:** this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Lagerev A. V., Makulina A. V. Simulation of Dynamic Loading of an Anchor Rope during Harvester Operation on a Steep Slope. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2025;(1):61–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2025.1.61>; EDN: NAFMUI

REFERENCES

1. Aggestam F., Konczal A., Sotirov M. et al. Can nature conservation and wood production be reconciled in managed forests? A review of driving factors for integrated forest management in Europe. *Journal of Environment Management.* 2020;268(9):110670. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110670
2. Naillon T., Rappin C. Best management and operating practices for steep slope machine logging. Technical Report No.: 98-02-2019. Olympia, Safety and Health Assessment and Research for Prevention Program, Washington State Department of Labor & Industries; 2019. 46 p.
3. Grigoriev I., Kunitskaya O., Rudov S. et al. Logging machines for working on slopes. *Bulletin of the LESTECH Association.* 2020;(2(2)):4–9. EDN: ORQYUO (In Russ.).
4. Kalyashov V. A., An D. T., Grigorieva O. I. Machine harvesting of wood in mountain logging areas. *LesPromInform.* 2022;(5):82–83. (In Russ.).
5. McEwan A., Marchi E., Spinelli R. et al. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *Journal of Forest Research.* 2020;31(2):339–351. DOI: 10.1007/s11676-019-01019-3
6. Bont L., Heinimann H. R. Optimum geometric layout of a single cable road. *European Journal of Forest Research.* 2012;131(5):1439–1448. DOI: 10.1007/s10342-012-0612-y
7. Visser R., Stampfer K. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering.* 2015;36(2):321–331.
8. Pokharel M., Belart F., Chung W. et al. Assessment of timber faller working conditions in mixed hand and tethered-machine cut harvest units on steep slopes – A case study in western Oregon. *International Journal of Forest Engineering.* 2023;34(3):408–416. DOI: 10.1080/14942119.2023.2170149
9. Holzfeind T., Visser R., Chung W. et al. Development and benefits of winch-assist harvesting. *Current Forestry Reports.* 2020;6(3-4):201–209. DOI: 10.1007/s40725-020-00121-8
10. Kováč J., Remper M., Krilek J. Analysis of the frictional coefficient at the pulling load on the tilted plane. *Acta Facultatis Technicae.* 2011;16 (1):65–72.

11. Berkett H., Visser R. Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Measuring slope of forestry machines on steep terrain. Harvesting Technical Note HTN05-02. Rotorua, NZ: Future Forests Research Ltd, 2012. 8 p.
12. Di Fulvio F., Acuna M., Ackerman P. et al. Benchmarking operational conditions, productivity, and costs of harvesting from industrial plantations in different global regions. *International Journal of Forest Engineering*. 2024;35(2):225–250. DOI: 10.1080/14942119.2023.2296789
13. Green P. Insight into the productivity, cost and soil impacts of a cable-assisted harvester forwarder thinning in western Oregon. Corvallis, Oregon State University; 2019. 125 p.
14. Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T. Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering*. 2021;32(3):202–215. DOI: 10.1080/14942119.2021.1906617
15. Beňo P., Krilek J., Kováč J. et al. The analysis of the new conception transportation cableway system based on the tractor equipment. *FME Transactions*. 2018;46(1):17–22. DOI: 10.5937/fmet1801017B
16. Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K. et al. Monitoring cable tensile forces of winch-assist harvester and forwarder operations in steep terrain. *Forests*. 2018;9(2):53. DOI: 10.3390/f9020053
17. Machuga O., Shchupak A., Styranivskiy O. et al. Field and laboratory research of the rut development process on forest roads. *Forests*. 2024;15(1):74. DOI: 10.3390/f15010074
18. Lagerev A. V., Lagerev I. A., Tarichko V. I. Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes. *Monograph*. Bryansk, Bryansk State University; 2022. 207 p. (In Russ.).
19. Lagerev A. V., Lagerev I. A. Design of passenger aerial ropeway for urban environment. *Urban Rail Transit*. 2019;5(1):17–28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z; EDN: WUVCOS
20. Birger I. A., Shorr B. F., Shneyjdorovich R. M. Calculation of the strength of machine parts. Moscow, Mashinostroenie; 1966. 616 p. (In Russ.).
21. Lagerev A. V., Lagerev I. A., Tarichko V. I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta (Scientific and Technical Journal of Bryansk State University)*. 2022;(3): 194–210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210; EDN: EVLPWZ (In Russ.).
22. Yablonskiy A. A. Course of theoretical mechanics. Part 2. Dynamics. Moscow, Vysshaya shkola; 1977. 430 p. (In Russ.).
23. Lagerev I. A., Lagerev A. V., Makulina A. V. Dynamic model of a harvester equipped with a rope anchor system during logging operations on a steep slope. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta (Scientific and Technical Journal of Bryansk State University)*. 2024;(3): 188–206. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-188-206; EDN: HPDZFFV (In Russ.).
24. Lagerev I. A., Lagerev A. V., Makulina A. V. Optimization of geometric characteristics of the harvester hydraulic manipulator kinematic scheme. The Certificate on official registration of the computer program. 2024. No. 2024668708. EDN: LNQHBT (In Russ.).
25. Fedorenchik A. S., German A. A., Protas P. A. Amkodor forestry machines. Minsk, Belarusian State Technological University; 2013. 240 p. (In Russ.).

The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 25.02.2025;
accepted for publication 03.03.2025

Information about the authors

Alexander V. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Vocational and Technological Education and Life Safety, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University. Research interests – optimal design, modeling of work processes, analysis of the dynamics and strength of transport and technological machines for various purposes and mobile rope systems. Author of 480 scientific publications, including 27 monographs, 100 patents and certificates of the Russian Federation for the results of intellectual activity. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>; SPIN: 6518-8902

Anna V. Makulina – Assistant of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, Bryansk State Academician I.G. Petrovski University. Research interests – modeling of work processes during the operation of forestry machines on steep slopes. Author of 50 scientific publications, including five certificates of the Russian Federation on the state registration of computer programs. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1698-2582>; SPIN: 7546-0990

Contribution of authors:

Lagerev A. V. – supervision of the research execution, development of a dynamic mathematical model, interpretation and analysis of the calculation results.

Makulina A. V. – computer implementation of the dynamic mathematical model, performing calculations, interpretation and analysis of the calculation results.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.