

МАШИНОСТРОЕНИЕ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ТРАНСПОРТ

doi: 10.51639/2713-0576_2023_3_2_37

УДК 621.86

ГРНТИ 68.47.43+66.15.17+66.15.19

ВАК 2.5.2

Исследование взаимодействия с грунтом анкерной опоры машины для лесозаготовки на склоне

Химич А. В.

*Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
241036, Россия, г. Брянск, ул. Бежицкая, д. 14*

email: annahimich14@mail.ru

В настоящее время наблюдается истощение запаса древесины на равнинных территориях. В связи с этим необходимо осуществлять заготовку древесины на холмистых участках местности. Для повышения устойчивости и сохранения возможности контролируемого перемещения по склону лесозаготовительные машины оснащаются лебёдками, которые посредством анкерного каната позволяют закрепить машину на склоне. Анкерный канат закрепляется за дерево или специальную опору, погружаемую в грунт. Для оценки прочности и способности опоры удержать машину на склоне были получены аналитические зависимости, а также выполнено моделирование методом конечных элементов. Разработанные модели и алгоритмы учитывают взаимодействие опоры с грунтом. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных – докторов наук № МД-1543.2022.4.

Ключевые слова: машина для лесозаготовки на склонах, лебёдка, анкерный канат, опора, грунт, расчёты, моделирование, метод конечных элементов.

Теория и методы исследования

В Российской Федерации значительные площади спелого древостоя сосредоточены не только на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов, но и в местах с частичным наличием сильно переувлажнённых грунтов, заболоченности и топей. Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах (с наклоном 30 и более градусов), которые в нижней своей части часто соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками) [1].

Для заготовки древесины в таких зонах не подходят стандартные машины (харвестеры, форвардеры) в базовой комплектации, так как они не могут устойчиво передвигаться вдоль крутых склонов. Поэтому они дорабатываются путём установки лебёдки, с помощью которого можно обеспечить закрепление машины на склоне с помощью анкерного каната (рис. 1) [2]. Машины для лесозаготовки на склонах (далее – МЛС) также оснащаются специальными системами управления, использующими цифровые двойники, которые позволяют оперативно реагировать на различные изменения оперативной обстановки и своевременно предотвращать потерю устойчивости и другие аварийные ситуации [3–5].



Рис. 1. Машина для лесозаготовки на склоне, оборудованная лебедкой

Анкерный канат может закрепляться за дерево. Также в качестве опоры можно использовать стальную балку, вертикально забиваемую в грунт перед началом работы машины для лесозаготовки на склоне. Общая схема такого решения показана на рис. 2.

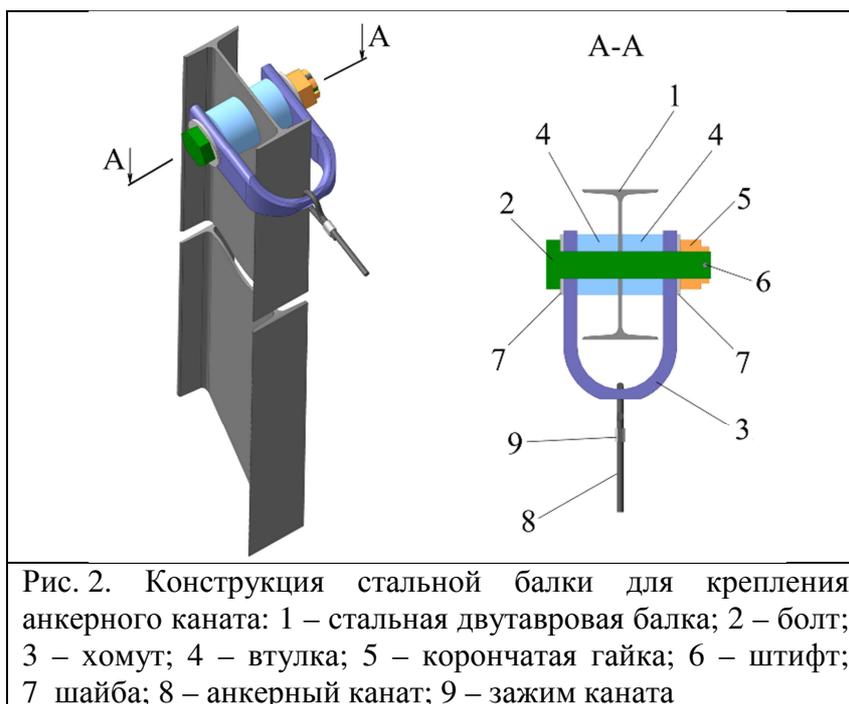


Рис. 2. Конструкция стальной балки для крепления анкерного каната: 1 – стальная двутавровая балка; 2 – болт; 3 – хомут; 4 – втулка; 5 – корончатая гайка; 6 – штифт; 7 шайба; 8 – анкерный канат; 9 – зажим каната

Конструкция (рис. 2) работает следующим образом. Стальная балка 1 изготовлена из двутавра и с одного конца имеет срез под углом 45° , что облегчает её погружение в грунт. В верхней части балки сделано отверстие, в которое вставлен болт 2, удерживающий хомут 3. Для выравнивания болта 2 и выравнивания нагрузки внутри таврового сечения с двух сторон установлены втулки 4. На болт накручена корончатая гайка 5, закрепленная штифтом 6. Под головку болта и гайку подложены шайбы 7. Анкерный канат 8 огибает хомут 3 и закрепляется зажимом 9. Таким образом, формируется шарнирное соединение, позволяющее анкерному канату отклоняться в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Расчётная схема формирования силы реакции при внедрении опоры в грунт показана на рис. 3. После начала нагружения опоры грунт деформируется, и внутри расширившегося отверстия балка поворачивается относительно точки О. Таким образом, взаимодействие с грунтом происходит частично по передним, частично по задним поверхностям.

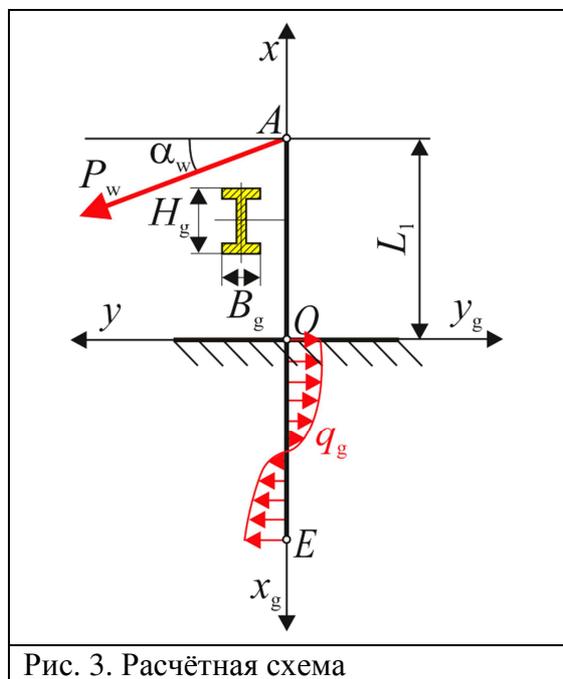


Рис. 3. Расчётная схема

Интенсивность распределенных реакций грунта q_g (Н/м) не может быть постоянной и может быть задана линейным законом $q_g = a_{0g}x_g + b_{0g}$. Коэффициенты a_{0g} и b_{0g} можно вычислить, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_g^2}{2} a_{0g} + L_g b_{0g} = P_w \cos \alpha_w, \\ \frac{L_g^3}{6} a_{0g} + \frac{L_g^2}{2} b_{0g} = P_w \cos \alpha_w L_1, \end{cases}$$

где P_w – усилие натяжения анкерного каната (Н), L_g – глубина внедрения опоры в грунт (м), L_1 – высота опоры (точки крепления анкерного каната над поверхностью грунта) (м), α_w – угол наклона анкерного каната (град).

Решив систему уравнений, получим

$$a_{0g} = \frac{-12P_w \cos \alpha_w (L_1 - 0,5L_g)}{L_g^3}, \quad b_{0g} = \frac{P_w \cos \alpha_w}{L_g} + \frac{6P_w \cos \alpha_w (L_1 - 0,5L_g)}{L_g^2}.$$

Значение предельно допустимого значения усилия $[P_w]$ можно вычислить по следующей формуле:

$$[P_w] = [R_0] \left(k_{R0} \cos \alpha_w \left(\frac{1,5L_g - L_1}{L_g^2 B_g} \right) \right)^{-1},$$

где B_g – ширина опоры (м), $[R_0]$ – несущая способность грунта (Па), k_{R0} – коэффициент запаса по несущей способности грунта.

Решив обратную задачу, можно оценить требуемую глубину заглубления $[L_g]$ (м) опоры в грунт при заданной величине усилия P_w , решив квадратное уравнение:

$$R_0 B_g^{-1} L_g^2 - 1,5 k_{R0} P_w \cos \alpha_w L_g + k_{R0} P_w \cos \alpha_w L_1 = 0$$

В рамках исследования разработана методика расчета стальной балки, вертикально забиваемой в грунт, методом конечных элементов с учетом влияния грунта согласно рекомендациям [6–8]. Расчётная схема и конечно-элементная модель показана рис. 4. При моделировании нижняя поверхность грунта закреплялась по всем направлениям. Боковые поверхности грунта закреплялись вдоль осей, перпендикулярных этим поверхностям. Усилие P_w приложено в виде двух компонент сосредоточенной силы (горизонтальной и вертикальной). Представленная на рис. 4, б конечно-элементная модель содержит 675353 объёмных конечных элементов в форме тетраэдра с 2065866 степенями свободы. Время расчёта составило 85 мин.

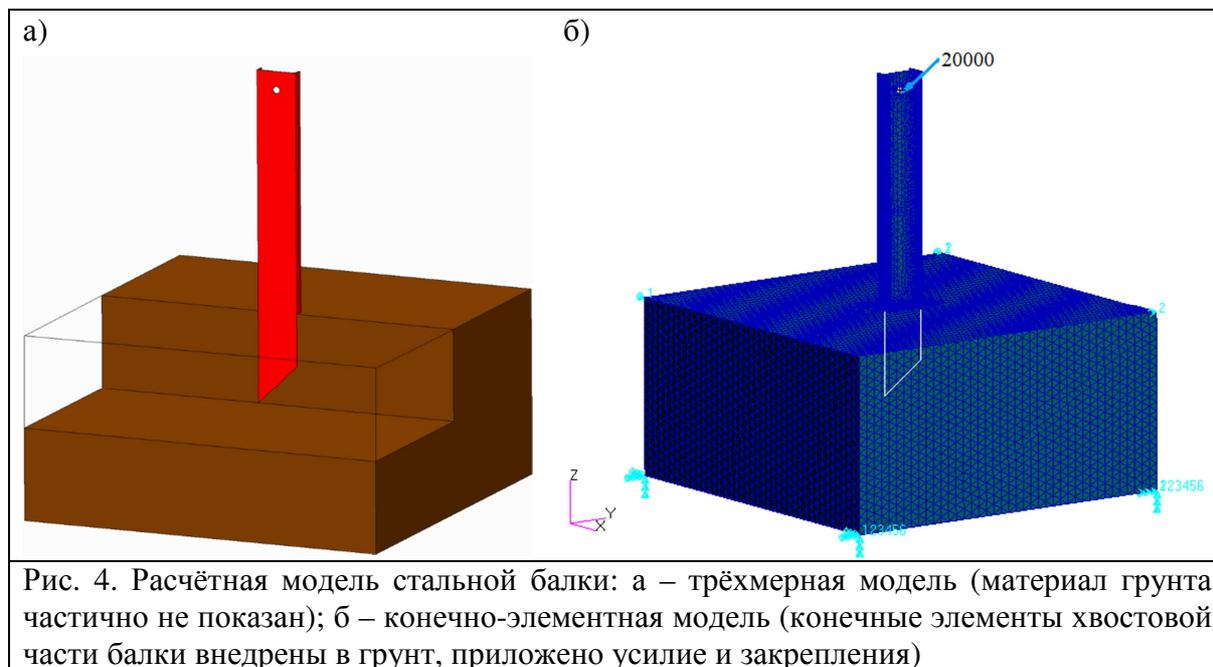
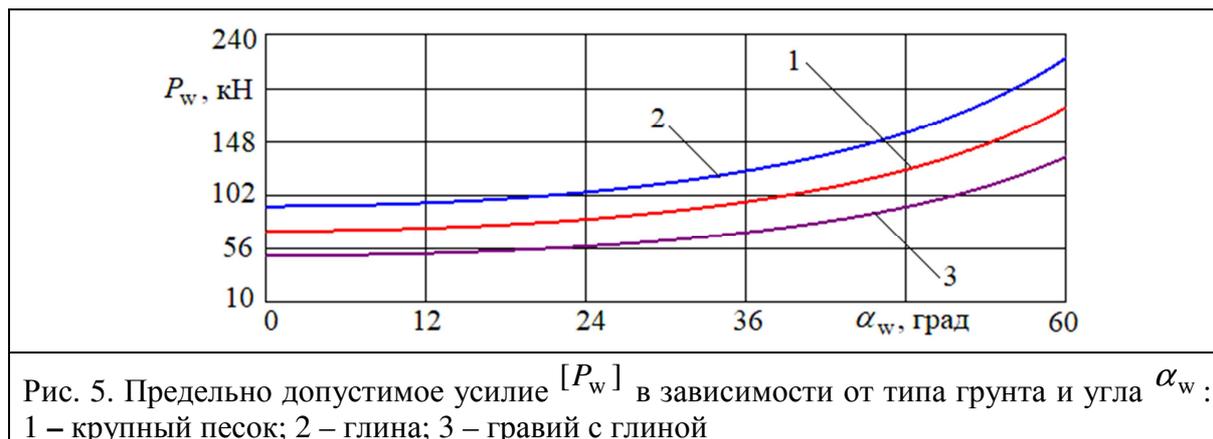


Рис. 4. Расчётная модель стальной балки: а – трёхмерная модель (материал грунта частично не показан); б – конечно-элементная модель (конечные элементы хвостовой части балки внедрены в грунт, приложено усилие и закрепления)

Полученные результаты и их обсуждение

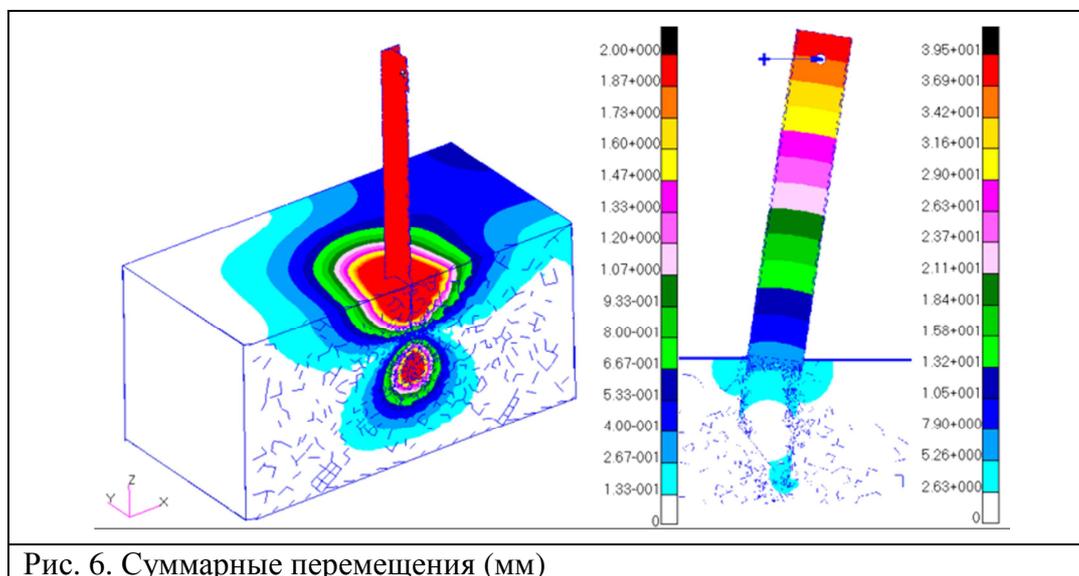
Значения предельно допустимого значения усилия $[P_w]$ в зависимости от угла приложения α_w приведены на графике (рис. 5). В расчётах было принято: $L_1=1,2$ м, $L_g=1,2$ м, $k_{R0}=1,4$, $B_g=0,11$ м (двутавр № 22).

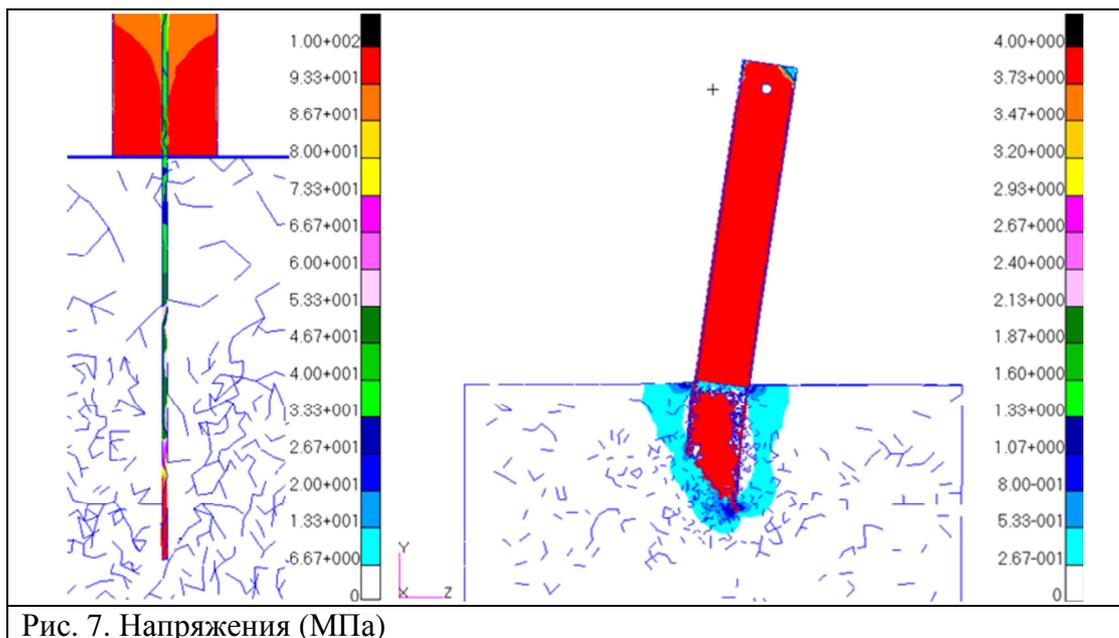


Анализ графика (рис. 5) показывает, что предельно допустимое усилие возрастает в 2...4 раза по сравнению с закреплением анкерного каната за дерево. В целом расчёты показывают, что использование стальной балки для закрепления машины на склоне является более эффективным.

Моделирование методом конечных элементов выполнено для случая $P_w=20$ кН, $\alpha_w=30^\circ$, $L_1=1,2$ м, $L_g=0,5$ м, профиль балки – двутавр № 22. Тестовые расчёты выполнены для грунта типа «крупный песок». Модули упругости стали $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0,3. Модули упругости грунта $30 \cdot 10^6$ Па, коэффициент Пуассона 0,5.

Результаты расчёта суммарных перемещений в системе с глинистым основанием показаны на рис. 6 и рис. 7.





Расчёты показали, что максимальные перемещения точки крепления анкерного каната составляют 40 мм, а давление на грунт по передней кромке стальной балки 267 000...450 000 Па, что соответствует несущей способности грунтов и аналитическому решению.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у неё нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ей ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Григорьев И., Куницкая О., Рудов С., Каляшов В., Тамби А. Лесозаготовительные машины для работы на склонах // Бюллетень ассоциации «Лестех». 2020. № 1. С. 4–9.
2. Химич А. В., Лагерев И. А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 159–164.
3. Лагерев А. В., Лагерев И. А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 38–60.
4. Лагерев А. В., Лагерев 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.
5. Лагерев А. В. Моделирование работы гидропривода механизма установки концевой опоры на самоходном шасси мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 110–124.
6. Лагерев И. А., Остроухов И. О., Химич А. В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №1. С. 83–94.

7. Лагерев И. А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов: монография. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с.

8. Лагерев И. А. Динамическая нагруженность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом // Подъемно-транспортное дело. 2011. №3. С. 7–9.

**Investigation of the interaction with the ground
of the anchor support of a logging machine on a slope**

Khimich A. V.

*Bryansk I.G. Petrovsky State University
241036, Russia, Bryansk, Bezhitskaya st., 14*

Currently, there is a depletion of the stock of wood in the plains. In this regard, it is necessary to carry out harvesting of wood on hilly areas of the terrain. To increase stability and preserve the possibility of controlled movement along the slope, logging machines are equipped with winches, which, by means of an anchor rope, allow the machine to be fixed on the slope. The anchor rope is attached to a tree or a special support that is immersed in the ground. To assess the strength and ability of the support to hold the car on the slope, analytical dependencies were obtained, and finite element modeling was performed. The developed models and algorithms take into account the interaction of the support with the ground. The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. MD-1543.2022.4.

Keywords: machine for logging on slopes, winch, anchor rope, support, soil, calculations, modeling, finite element method.