

УДК (UDC) 621.86

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ОПОРЫ АНКЕРНОГО КАНАТА МАШИНЫ  
ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВКИ НА СКЛОНЕTHE STRENGTH ASSESSMENT OF THE ANCHOR ROPE SUPPORT  
OF THE MACHINE FOR LOGGING ON THE SLOPEХимич А.В.  
Khimich A.V.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье представлена методика расчета взаимодействия опоры и анкерного каната машины для лесозаготовки на склоне. Рассмотрены случаи использования в качестве опоры отдельно стоящего дерева и стальной двутавровой балки, вертикально забиваемой в грунт. Расчеты выполнены с помощью аналитических зависимостей, а также методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** машина для лесозаготовки, склон, опора, дерево, балка, анкерный канат.

**Дата принятия к публикации:** 25.01.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Химич Анна Васильевна** – аспирант ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
e-mail: annahimich14@mail.ru.

**Abstract.** The article presents a method for calculating the interaction of a support and an anchor rope of a logging machine on a slope. The cases of using a free-standing tree and a steel I-beam vertically driven into the ground as a support are considered. Calculations are performed using analytical dependencies, as well as the finite element method.

**Keywords:** logging machine, slope, support, tree, beam, anchor rope.

**Date of acceptance for publication:** 25.01.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Author's information:**

**Anna V. Khimich** – postgraduate at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,  
e-mail: annahimich14@mail.ru.

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-1543.2022.4

**Acknowledgements**

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-1543.2022.4

**1. Введение**

В Российской Федерации значительные площади спелого древостоя сосредоточены на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов (с продольным 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 дора-

батываются путем установки лебедки, с помощью которой можно обеспечить закрепление машины на склоне с помощью анкерного каната (рис. 1) [2].

Машины для лесозаготовки на склонах 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].



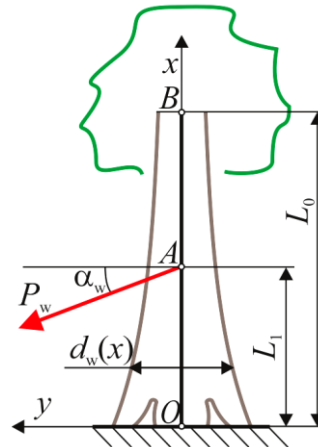
Рис. 1. Машина для лесозаготовки на склоне, оборудованная лебедкой

## 2. Исследование взаимодействия дерева и анкерного каната

В общем случае (рис. 2) нагрузка со стороны анкерного каната  $P_w$  (Н) приложена к дереву в точке А под углом  $\alpha_w$  на высоте  $L_1$  (м) от основания дерева (точка О). Общая высота дерева –  $L_0$  (м). Диаметр ствола дерева  $d_w$  (м) можно считать постоянным, но в общем случае он переменен по высоте –  $d_w = d_w(x)$ . Таким образом, в расчетах дерево считается упругим стержнем ОВ переменного сечения.

При исследовании динамических процессов жесткость дерева определяется модулем упругости  $E_w$  (Па) и геометрическими характеристиками, переменными по высоте.

Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия дерева и анкерного каната при оценке статической прочности



При исследовании динамических процессов жесткость дерева определяется модулем упругости  $E_w$  (Па) и геометрическими характеристиками, переменными по высоте.

Угол  $\alpha_w$  зависит от параметров размещения опоры, лесозаготовительной машины и угла продольного наклона  $\alpha_s$  склона. Расчетная схема определения угла показана на рис. 3.

Угол  $\alpha_w$  можно вычислить следующим образом:

$$\alpha_w = \arctg\left(\operatorname{tg}(\alpha_s) + \frac{L_1 - H_{\text{mls}}}{L_{\text{mls}}}\right), \quad (1)$$

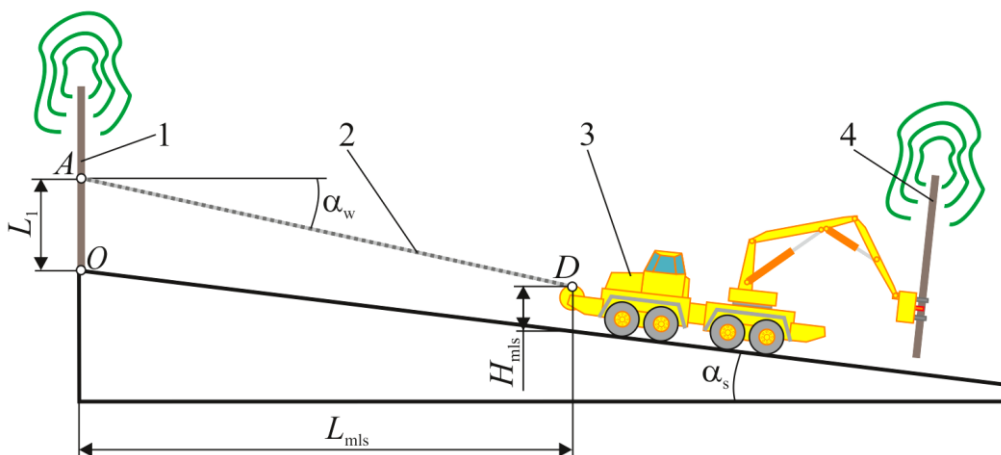


Рис. 3 – Расчетная схема определения угла приложения нагрузки к дереву  $\alpha_w$  :

- 1 – дерево, за которое крепится анкерный канат; 2 – анкерный канат;  
 3 – машина для лесозаготовки на склоне; 4 – спиленное дерево

где  $L_{m/s}$  – горизонтальное расстояние от точки крепления каната до дерева, за которое закреплен анкерный канат, м;  $H_{m/s}$  – высота от поверхности склона до точки схода каната с лебедки, м.

График угла приложения каната согласно формуле (1) при различных параметрах системы показан на рис. 4.

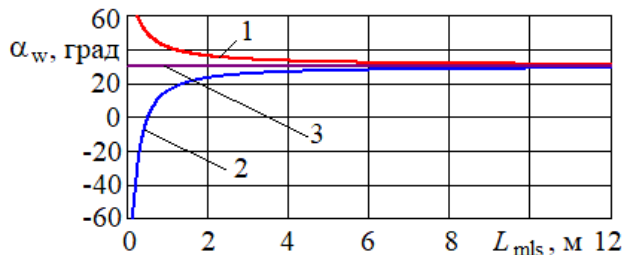


Рис. 4 – Значения угла приложения нагрузки к дереву  $\alpha_w$  при  $\alpha_s = 30^\circ$ : 1 –  $L_1 = 1,5$  м,  $H_{m/s} = 1,2$  м; 2 –  $L_1 = 1,2$  м,  $H_{m/s} = 1,5$  м; 3 –  $L_1 = H_{m/s} = 1,2$  м

Из графика (рис. 4) следует, что угол приложения нагрузки существенно меняется вблизи дерева, за которое закреплен анкерный канат. С ростом расстояния  $L_{m/s}$  величина угла  $\alpha_w$  стремится к величине угла  $\alpha_s$ . При  $L_{m/s} = L_1$  угол каната равен углу склона. При  $L_{m/s} < L_1$  угол каната всегда положителен и усилие каната вызывает совместный изгиб и сжатие дерева, за которое закреплен анкерный канат. При  $L_{m/s} > L_1$  угол каната положителен, пока  $L_{m/s} > (H_{m/s} - L_1) \operatorname{tg}^{-1} \alpha_s$  и усилие каната вызывает совместный изгиб и сжатие дерева, за которое закреплен анкерный канат. Когда  $L_{m/s} = (H_{m/s} - L_1) \operatorname{tg}^{-1} \alpha_s$  угол каната  $\alpha_w$  становится равным нулю. При дальнейшем перемещении машины и уменьшении  $L_{m/s}$  угол каната становится отрицательным, и усилие каната вызывает совместный изгиб и растяжение дерева, за которое закреплен анкерный канат.

Следует отметить, что для реальных соотношений размеров данный эффект наблюдается только при очень близком подходе машины к дереву (на 0,5 м и менее). Такая

ситуация при реальном соотношении размеров маловероятна.

Механические напряжения, действующие в сечении дерева, определяемом координатой  $x$ :

$$\sigma_w(x) = \frac{4k_{Pw}P_w \sin \alpha_w}{\pi d_w^2(x)} + \frac{16P_w \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3(x)}, \quad (2)$$

где  $k_{Pw}$  – коэффициент передачи усилия, учитывающий возможность не плотного закрепления анкерного каната не плотно закреплена на дереве (при плотном закреплении  $k_{Pw} = 1$ ).

Предельно допустимую величину усилия  $[P_w]$  можно вычислить из условия

$$\max(\sigma_w(x)) \leq [\sigma_w], \quad (3)$$

где  $[\sigma_w]$  – допускаемые напряжения, Па, определяемые для каждого сорта древесины следующим образом:

$$[\sigma_w] = \sigma_{wb} / k_{\sigma w}, \quad (4)$$

где  $k_{\sigma w}$  – коэффициент запаса, принимаемый равным 3,5...4;  $\sigma_{wb}$  – предел прочности древесины при заданной влажности, Па (определяется на основе эксперимента).

На месте проведения работ произрастают деревья известного диаметра. Для удобства расчетов для промышленной древесины можно считать  $d_w(x) = \text{const}$ . Тогда значение предельно допустимого усилия  $[P_w]$  согласно выражению (2) можно вычислить по следующей формуле:

$$[P_w] = \frac{[\sigma_w]}{\frac{4k_{Pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2} + \frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}} \quad (5)$$

Выражения (2) и (5) справедливы, если считать материал дерева изотропным. На самом деле, пределы прочности древесины при растяжении-сжатии и изгибе различны. В этом случае необходимо отдельно рассматривать сжатие и изгиб дерева, за которое закреплен анкерный канат.

В дереве, используемом в качестве опоры анкерного каната, действуют напряжения сжатия  $\sigma_{wx}$  и изгиба  $\sigma_{wy}$ :

$$\sigma_{wx}(x) = \frac{4k_{Pw}P_w \sin \alpha_w}{\pi d_w^2(x)},$$

$$\sigma_{wy}(x) = \frac{16P_w \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3(x)}. \quad (6)$$

Таблица 1

Пределы выносливости основных пород древесины в зонах промышленной лесозаготовки при влажности древесины 12-15% [2]

Порода дерева	Предел сопротивления, МПа		
	При растяжении-сжатии $[\sigma_{wx}]$	При изгибе $[\sigma_{wy}]$	Для выражения (4)
Сосна	43,9	79,3	79,3
Береза	44,7	99,7	99,7
Осина	37,4	76,6	76,6

Прочность дерева считается обеспеченной, если отдельно выполнены условия прочности при растяжении-сжатии, а также условие (3):

$$\sqrt{\sigma_{wx}^2(x) + \sigma_{wy}^2(x)} \leq \sqrt{[\sigma_{wx}]^2 + [\sigma_{wy}]^2}, \quad (7)$$

где  $[\sigma_{wx}]$  – допускаемые напряжения при растяжении-сжатии дерева, Па;  $[\sigma_{wy}]$  – допускаемые напряжения при изгибе дерева, Па.

Допускаемые напряжения в выражении (7) определяются по формуле (4) в зависимости от предела выносливости при растяжении-сжатии  $\sigma_{wx}$  (Па) и при изгибе  $\sigma_{wy}$  (Па). Таким образом, для оценки прочности используются эквивалентные напряжения при многоосном (двухосном) напряженно-деформированном состоянии. Значения пределов прочности, принятые при расчетах в ходе исследования, приведены в табл. 1.

Величину предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$ , действующего на дерево со стороны анкерного каната согласно выражениям (6) можно вычислить по следующей формуле:

$$[P_w] = \min \left( \frac{[\sigma_{wx}]}{\frac{4k_{pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2}}, \frac{[\sigma_{wy}]}{\frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}}, \frac{[\sigma_w]}{\frac{4k_{pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2} + \frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}} \right). \quad (8)$$

Величина предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$  согласно выражениям (3) и (8) в зависимости от угла приложения  $\alpha_w$  и диаметра  $d_w$  приведены на графиках, представленных на рис. 5. В расчетах было принято:  $k_{\sigma w} = 3,5$ ,  $k_{P_w} = 1$ .

Анализ графиков, показанных на рис. 5, показывает, что минимальное значение предельно допустимого усилия получается согласно формуле (5). С ростом характеристик прочности древесины (пределов сопротивления) закономерно растет величина предельно допустимого усилия.

С ростом угла наклона каната  $\alpha_w$  предельно допустимое усилие повышается, так как увеличивается доля нагрузки, вызывающее сжатие. Несмотря на более низкий предел прочности древесины на сжатие, более важными оказываются значения геометрических параметров сечения дерева.

Так как средний диаметр деревьев в типичной зоне лесозаготовки лежит в пределах 0,2-0,3 м, то предельно допустимое усилие при углах склона от 30° составляет 10...12 кН, что позволяет выдерживать нагрузки, действующие со стороны лесозаготовительных машин.

### 3. Исследование взаимодействия двутавровой балки и анкерного каната

Анкерный канат может закрепляться за дерево. Также в качестве опоры возможно использовать стальную балку, вертикально забиваемую в грунт перед началом работы машины для лесозаготовки на склоне. Общая схема такого решения показана на рис. 6.

Конструкция (рис. 6) работает следующим образом. Стальная балка 1 изготовлена из двутавра и с одного конца имеет срез под углом 45°, что облегчает ее погружение в

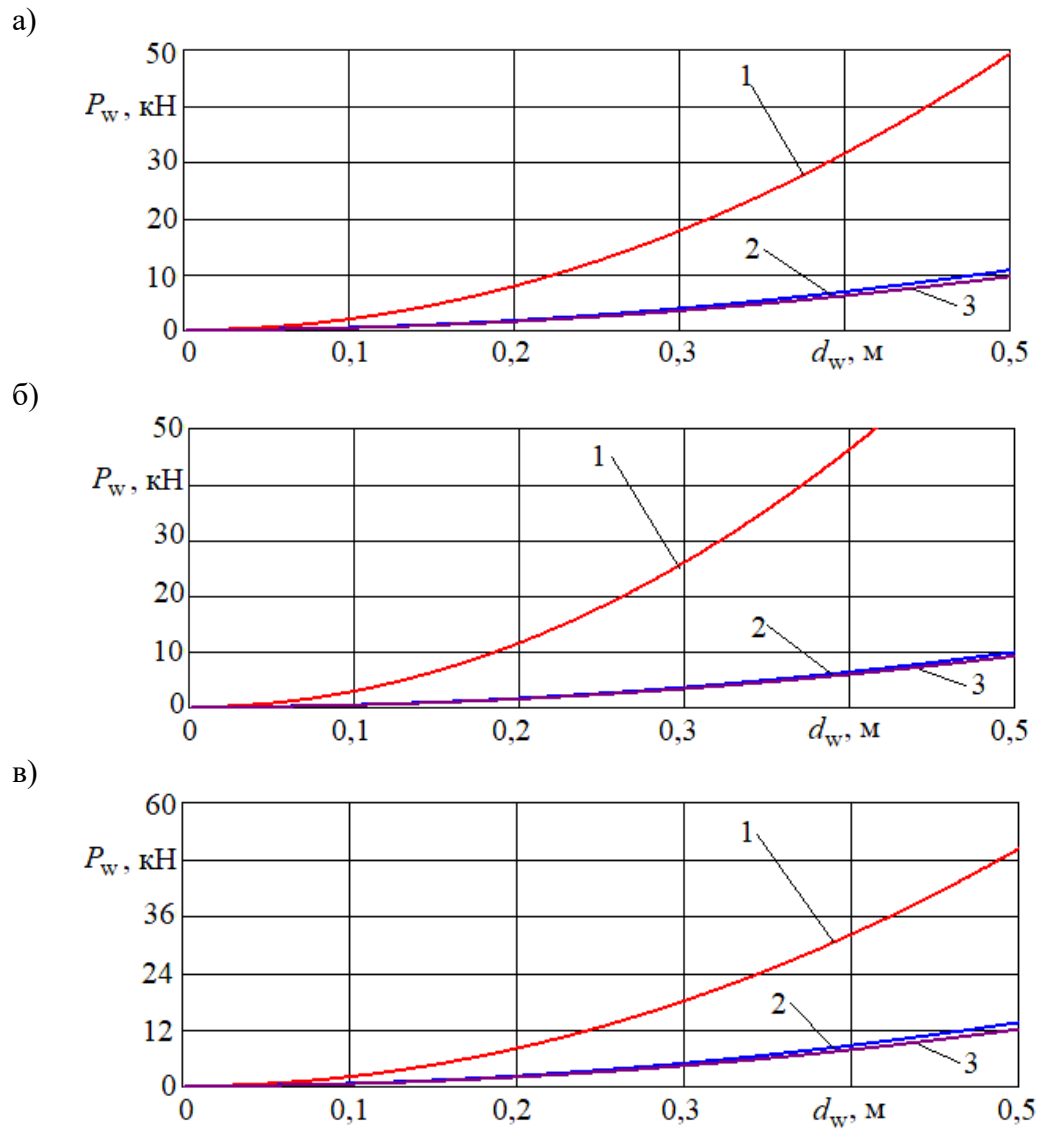


Рис. 5. Предельно допустимое усилие [ $P_w$ ] для сосны в зависимости от диаметра дерева  $d_w$ : а –  $\alpha_w = 30^\circ$ ; сосна; б –  $\alpha_w = 20^\circ$ , сосна; в –  $\alpha_w = 30^\circ$ , береза (1 – допустимое усилие при растяжении-сжатии; 2 – допустимое усилие при изгибе; 3 – допустимое усилие по выражению (5))

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 от-

клоняться в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Расчетная схема формирования силы реакции при внедрении опоры в виде балки в грунт показана на рис. 7. После начала нагружения опоры грунт деформируется [6], и внутри расширившегося отверстия балка поворачивается относительно точки  $O$ . Таким образом, взаимодействие опоры анкерного каната с грунтом происходит частично по передним, частично по задним поверхностям.

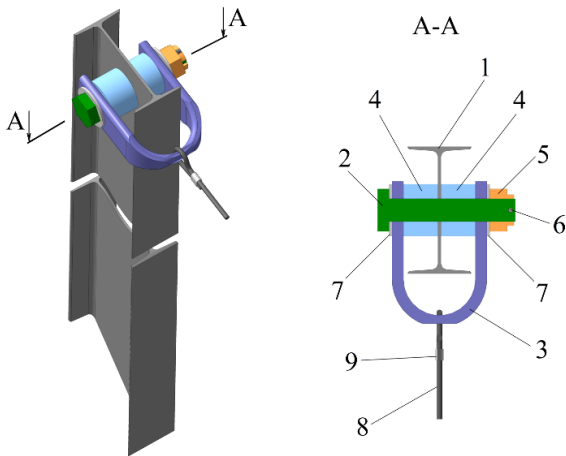


Рис. 6. Конструкция стальной балки для крепления анкерного каната:

- 1 – стальная двутавровая балка; 2 – болт;  
 3 – хомут; 4 – втулка; 5 – корончатая гайка;  
 6 – штифт; 7 – шайба; 8 – анкерный канат;  
 9 – зажим каната

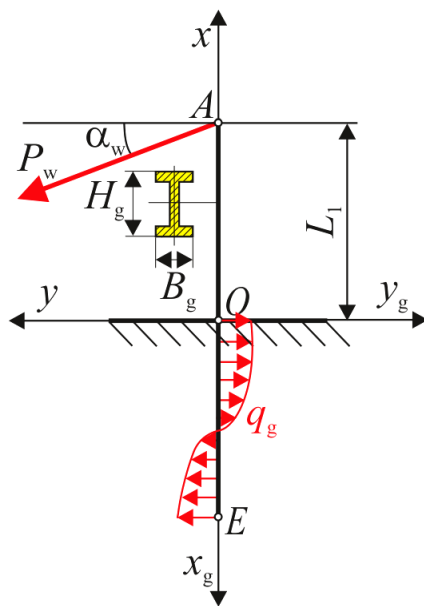


Рис.7. Расчетная схема

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;  $\alpha_w$  – угол наклона анкерного каната, град.

Решив систему уравнений, получим

$$a_{0g} = \frac{-12P_w \cos \alpha_w (L_1 - 0,5L_g)}{L_g^3},$$

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

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

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

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  $[L_g]$  опоры в грунт при заданной величине усилия  $P_w$ , решив квадратное уравнение:

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

Значения предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$  в зависимости от угла приложения  $\alpha_w$  приведены на графике (рис. 8). В расчетах 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. 8) показывает, что предельно допустимое усилие возрастает в 2...4 раза по сравнению с закреплением за дерево. В целом, использование стальной балки для закрепления машины на склоне является более эффективным.

В рамках исследования разработана методика расчета стальной балки, вертикально забиваемой в грунт, методом конечных элементов с учетом влияния грунта согласно рекомендациям [6-8]. Расчетная схема и конечноэлементная модель показана рис. 9.

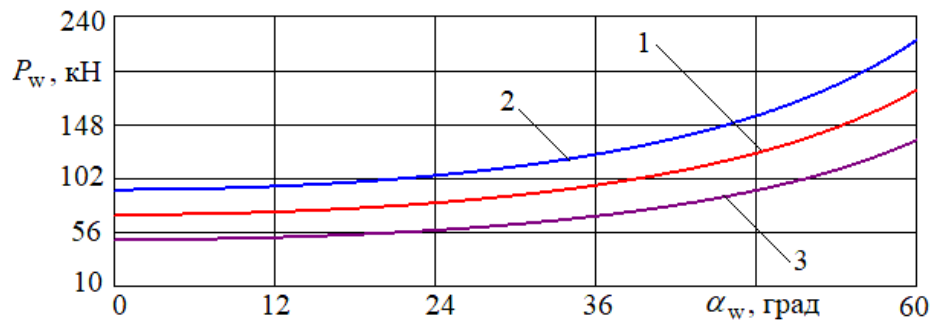


Рис. 8. Предельно допустимое усилие [ $P_w$ ] в зависимости от типа грунта и угла  $\alpha_w$ : 1 – крупный песок; 2 – глина; 3 – гравий с глиной

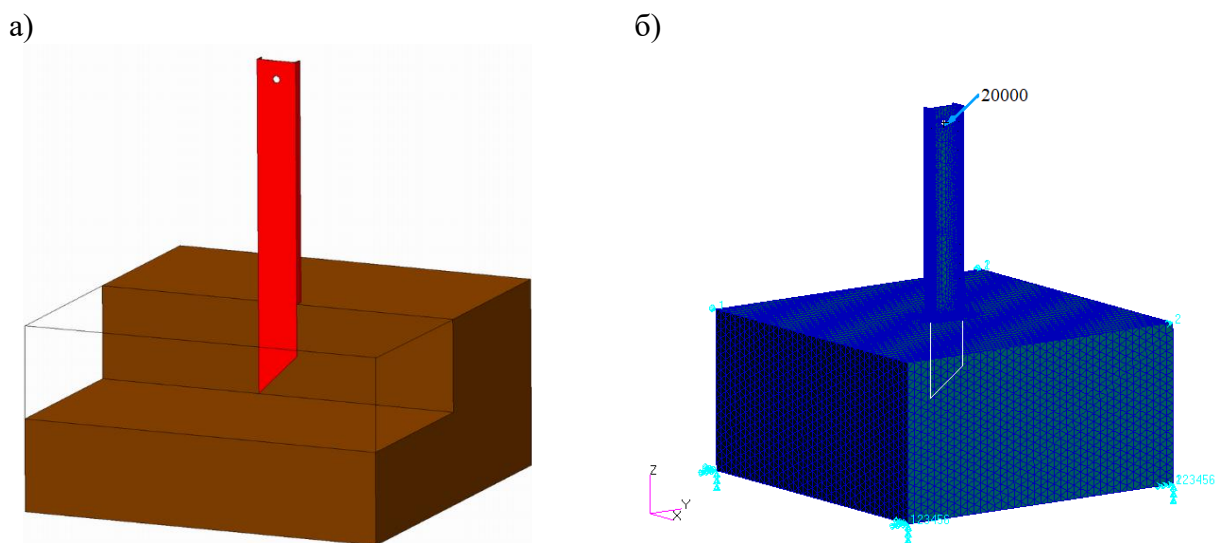


Рис. 9. Расчетная модель стальной балки: а – трехмерная модель (материал грунта частично не показан); б – конечноэлементная модель (конечные элементы хвостовой части балки внедрены в грунт, приложено усилие и закрепления)

При моделировании нижняя поверхность грунта закреплялась по всем направлениям. Боковые поверхности грунта закреплялись вдоль перпендикулярных осей. Усилие  $P_w$  прикладывалось в виде двух компонент сосредоточенной силы (горизонтальной и вертикальной). Представленная на рис. 9, б конечноэлементная модель содержит 675353 объемных конечных элементов в форме тетраэдра с 2065866 степенями свободы. Время расчета составило 85 мин.

Моделирование выполнено для случая  $P_w=20$  кН,  $\alpha_w=30^\circ$ ,  $L_1=1,2$  м,  $L_g=0,5$  м, балка – двутавр № 22. Тестовые расчеты выполнены для грунта типа «Крупный песок». Модули упругости стали  $2,1 \cdot 10^{11}$  Па, коэф-

фициент Пуассона 0,3. Модули упругости грунта  $30 \cdot 10^6$  Па, коэффициент Пуассона 0,5. Результаты расчета суммарных перемещений в системе с глинистым основанием показаны на рис. 10 и рис. 11.

#### 4. Основные выводы

1. Средний диаметр деревьев в типичной зоне лесозаготовки (0,2...0,3 м) позволяет обеспечить надежное удержание машины для лесозаготовки на склоне, так как обеспечивается предельная величина усилия на опоре 10-12 кН.

2. Использование стальной двутавровой балки для закрепления машины на склоне является более эффективным, так как позво-

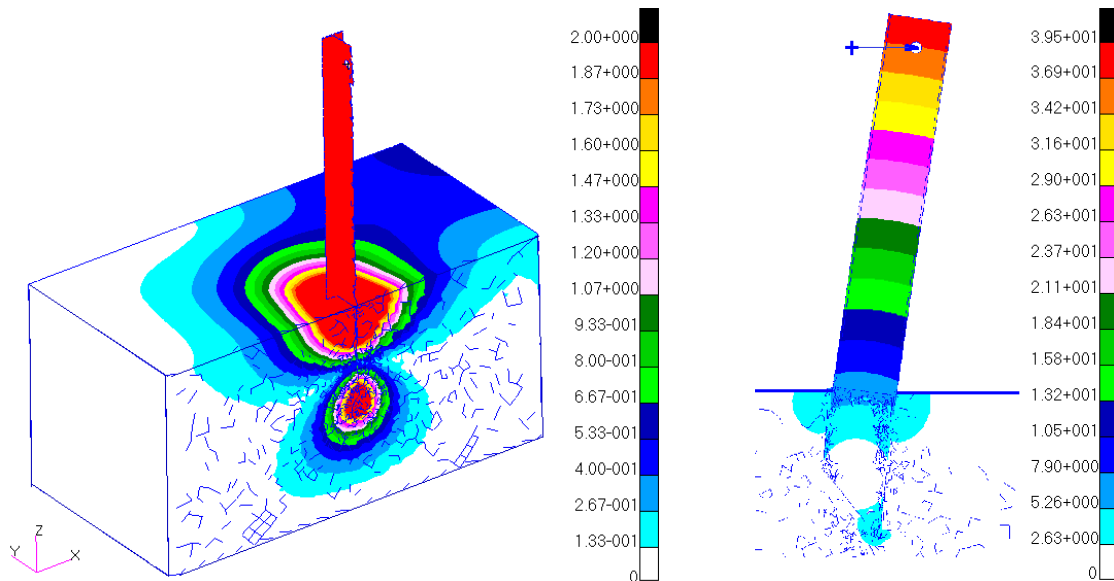


Рис. 10. Суммарные перемещения, мм

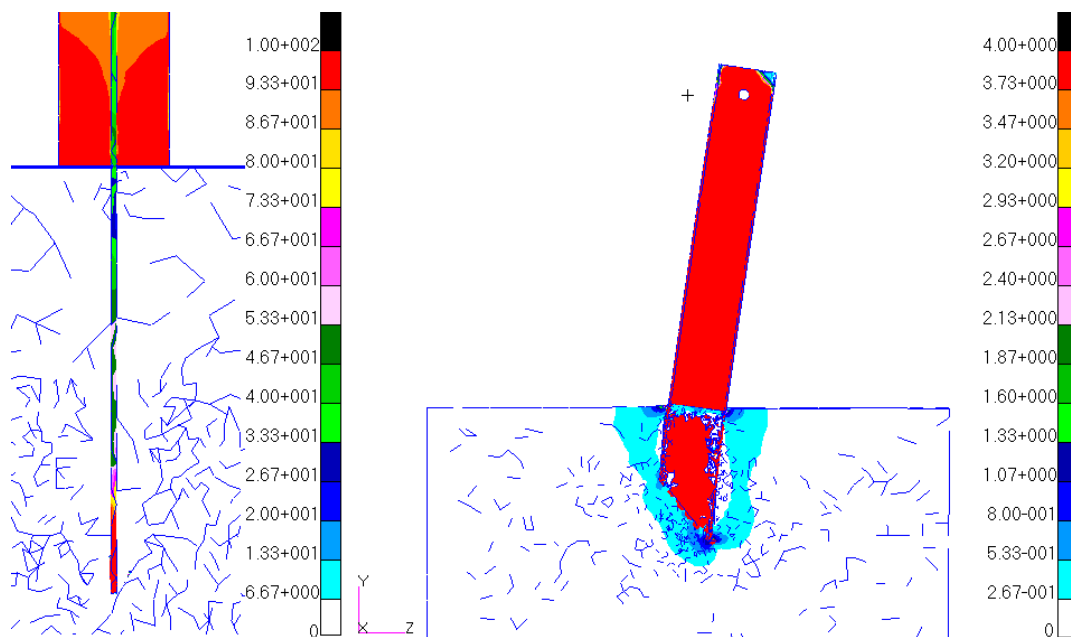


Рис. 11. Эквивалентные напряжения, МПа

ляет выдерживать в 2-4 раза большие нагрузки, чем отдельно стоящее дерево.

3. Максимальные перемещения точки крепления анкерного каната для опоры в ви-

де балки при деформации грунта составляют 40 мм, а давление на грунт по передней кромке стальной балки 267...450 МПа, что соответствует несущей способности грунтов и аналитическому решению.

### 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.

### References

1. Grigoriev I., Kunitzskaya O., Rudov S., Kalyashov V., Tambi A. Logging machines for working on slopes. *Bulletin of the Lestekh association*, 2020, No.1, pp. 4-9. (In Russian)



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. 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.

2. Khimich A.V., Lagerev I.A. Investigation of the dynamic loading of a mobile rope transport-technological machine located on a slope. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 159-164. (In Russian)

3. Lagerev A.V., Lagerev I.A. General approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and handling rope complexes. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 38-60. (In Russian)

4. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of rope tension forces during the operation of mobile transport-handling rope complexes. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.3, pp. 194-210. (In Russian)

5. Lagerev A.V. Modeling of the operation of the hydraulic drive of the mechanism for installing the end support on a self-propelled chassis of a mobile cable car. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 110-124. (In Russian)

6. Lagerev I.A., Ostroukhov I.O., Khimich A.V. Computer simulation of the process of loss of overall stability of a mobile machine equipped with a boom handling system. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.1, pp. 83-94. (In Russian)

7. Lagerev I.A. Modeling of work processes of manipulation systems of mobile multi-purpose transport-technological machines and complexes: monograph. Bryansk, RIO BGU, 2016. 371 p. (In Russian)

8. Lagerev I.A. Dynamic loading of a crane-manipulator of a machine for welding pipelines when moving with a load. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No.3, pp. 7-9. (In Russian)