

Математическое и имитационное моделирование непроницаемости технических средств сбора и сгребания порубочных остатков

А.А. Платонов^{1a}, М.А. Гнусов^{1b}

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

^a paa7@rambler.ru, ^b mgnusov@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Статья поступила 23.09.2025, принята 05.11.2025

Спонтанное и при этом естественное размножение деревьев и кустарников самых различных видов оказывает неблагоприятное воздействие на производственный процесс линейных инфраструктурных объектов. Существующие технологические процессы удаления нежелательной растительности зачастую не предусматривают наличие специализированного оборудования, однако для механизированного сбора или сгребания порубочных остатков необходимы особые технические средства, а именно «лесные грабли». Выявлено отсутствие научных исследований, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных граблей, как определение (в том числе – математическое и имитационное моделирование: цель исследования) параметра непроницаемости лесных граблей для повышения эффективности их работы. Показано, что коэффициент непроницаемости граблей определяется как отношение количества экземпляров порубочных остатков, сгребленных (собранных) с определённой площади (m^2), к количеству всех экземпляров порубочных остатков, находившихся на указанной площади до начала их сгребания (сбора), с учётом плотности (шт./ m^2) скапливания порубочных остатков. Установлено, что на возможность проникновения экземпляров порубочных остатков между двумя соседними зубьями лесных граблей оказывают влияние ветвистость порубочных остатков, их прочностные характеристики, а также взаимодействие с зубьями лесных граблей и между собой. Для распространённых в отечественном машиностроении лесных граблей с ломанным профилем зубьев разработаны nomograms определения коэффициента непроницаемости лесных граблей в зависимости от интервала между двумя соседними зубьями, количества зубьев и длины порубочных остатков. Определено, что при наиболее вероятном интервале между двумя соседними зубьями указанных лесных граблей около 500 мм коэффициент их непроницаемости варьируется в диапазоне 82...91 %; при количестве зубьев более 14 непроницаемость различается незначительно (95...98 %). Для очистки территорий с преимущественной длиной порубочных остатков менее 500...800 мм нецелесообразно применение лесных граблей с количеством зубьев 4...5 ввиду недостаточной непроницаемости данных технических средств (68...85 %).

Ключевые слова: нежелательная растительность; удаление; порубочные остатки; сбор; сгребание; непроницаемость; моделирование; nomograms; рекомендации.

Mathematical and simulation modeling of the impermeability of technical means for collecting and raking logging residues

А.А. Платонов^{1a}, М.А. Гнусов^{2b}

¹ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

^a paa7@rambler.ru, ^b mgnusov@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Received 23.09.2025, accepted 05.11.2025

Spontaneous and at the same time natural reproduction of trees and shrubs of various types has an adverse effect on the production process of linear infrastructure facilities. Existing technological processes for removing unwanted vegetation often do not provide for the presence of specialized equipment, however, for the mechanized collection or raking of logging residues, special technical means are required, namely "forest rakes". A lack of scientific research has been revealed that evaluates such a key point in achieving optimal performance of forest rakes as determining (including mathematical and simulation modeling: the purpose of the study) the impermeability parameter of forest rakes to improve the efficiency of their work. It is shown that the impermeability coefficient of a rake is defined as the ratio of the number of specimens of logging residues raked (collected) from a certain area (m^2) to the number of all specimens of logging residues located in the specified area before the start of their raking (collection), taking into account the density (pieces/ m^2) of accumulation of logging residues. It is established that the possibility of non-penetration of specimens of logging residues between two adjacent teeth of a forest rake is influenced by the branching of the logging residues, their strength characteristics, as well as interaction with the teeth of a forest rake and with each other. For forest rakes with broken tooth profiles, which are common in the domestic mechanical engineering, nomograms have been developed for determining the impermeability coefficient of forest rakes depending on the interval between two adjacent teeth, the number of teeth and the length of logging residues. It is determined that with the most probable interval between two adjacent teeth of the specified forest rake being about 500 mm, their impermeability coefficient varies in the range of 82...91 %; when the number of teeth is more than 14, the impermeability varies slightly (95...98 %). To clean areas with a predominant length of logging residues of less than 500...800 mm, it is not advisable to use forest rakes with a number of teeth of 4...5 due to the insufficient impermeability of these technical means (68...85 %).

Keywords: unwanted vegetation; removal; logging residues; collection; raking; impermeability; modeling; nomograms; recommendations.

Введение и обзор литературы по теме исследования. Произрастание нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР) нередко является большой проблемой для целого ряда хозяйствующих субъектов. Спонтанное и при этом естественное размножение деревьев и кустарников самых различных видов оказывает неблагоприятное воздействие на производственный процесс таких инфраструктурных объектов, как железные и автомобильные дороги, линии электропередачи, мелиоративные каналы и т. д. В рамках нормативно-технического содержания указанных и подобных им объектов нежелательная растительность подлежит удалению, при этом, не рассматривая в данном исследовании способ мульчирования, фактически все остальные способы воздействия на нежелательную растительность предусматривают формирование определённого объёма порубочных (в том числе – выкорчёванных, вырванных) остатков.

Современные публикации, посвящённые вопросам очистки территорий от нежелательной растительности, в том числе – культуртехническим работам [1–3], зачастую характеризуются ограниченным объёмом или глубиной анализа [4, 5], заключающихся лишь в описании технико-экономических характеристик отдельных машин и механизмов [6–8], в том числе – применительно к конкретной технологии применения устройств сбора и сгребания срезанной (вырубленной) нежелательной растительности [9, 10].

Актуальные практики лесоводства в глобальном масштабе зачастую не включают наличие специализированного оборудования, что обуславливает ручное выполнение технологической операции по сбору (сгребанию) порубочных остатков [11]. Однако в рамках данного исследования авторы намеренно исключили из рассмотрения ручной метод сбора (сгребания) порубочных остатков, несмотря на его широкое применение в России, учитя при этом, что для выполнения этой задачи необходимы специализированные технические средства, объединённые под общим названием «лесные грабли» [12]. Признавая значимость и потенциал [13] для реализации указанной технологической операции, следует отметить, что лесные грабли в настоящее время являются предметом лишь поверхностного рассмотрения в отечественных и мировых научно-исследовательских работах [14, 15].

В ходе проведённого анализа актуальных (отечественных и зарубежных) научных публикаций было выявлено отсутствие работ, которые бы оценивали как по отдельности, так и в совокупности, критерии совершенствования технических средств для сбора или сгребания порубочных остатков (лесных граблей). Анализ рассматриваемых технических средств зачастую ограничивается лишь рамками обсуждения необходимости сбора (фактически – заготовки) формирующейся биомассы из формирующихся после удаления растительности порубочных остатков.

В частности, в фокусе некоторых современных научных работ находится анализ причинно-следственной связи между процессом сгребания порубочных остатков и его экологическими эффектами [16–18], активно исследуется, какие преимущества для лесозаготовителей

несут в себе новые, формирующиеся от сгребания порубочных остатков рынки биомассы [19–21], а также возможности применения «зелёных отходов» как дешёвого источника энергии [22–24]. В рамках ряда научных исследований проводится анализ корреляционной зависимости между объёмом финансовых затрат на утилизацию порубочных остатков методом сгребания и показателями эффективности данной технологической операции [25, 26], в том числе – по различным придорожным территориям [27–29]. Лишь некоторые исследователи [30, 31] выделяют необходимость определения и дальнейшего учёта объёма собираемой (сгребаемой) биомассы, при этом наш обзор выявил отсутствие исследований, оценивающих такой ключевой момент достижения оптимальной производительности лесных граблей, как определение (в том числе – моделирование) параметра непроницаемости рассматриваемых технических средств сгребаемыми (собираемыми) порубочными остатками.

Целью исследования является разработка математической модели и проведение имитационного моделирования непроницаемости лесных граблей порубочными остатками для повышения эффективности их работы.

Цель работы достигается посредством разработки соответствующего математического описания, принимающего во внимание конструктивные параметры технических средств сгребания порубочных остатков (лесных граблей), а также параметры порубочных остатков с учётом влияющих факторов формирования лесными граблями вороха волочения порубочных остатков.

Материалы и методика исследования. Предметом теоретического исследования является анализ и моделирование физических характеристик движения древесной биомассы при её перемещении по очищаемым поверхностям и лесным граблям.

Объект исследования представлял собой лесные грабли, закрепляющиеся на переднюю или заднюю навеску трактора (например, типа Belarus-82.1; рис. 1, а) или на рукоять стрелы многофункциональной машины, выполненной на шасси «экскаватор» (например, типа Kubota KX080-4; рис. 1, б).

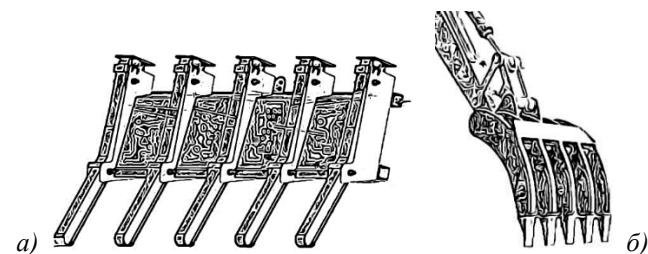


Рис. 1. Модели лесных граблей

Предметом исследования является математическая модель формирования посредством лесных граблей объёма вороха порубочных остатков с учётом параметров лесных граблей и сгребаемой биомассы.

Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования, а именно: кинематический (для учёта траектории движения порубочных остатков), динамический (для учёта устойчивости

лесных граблей к проникновению одиночных или сцепленных между собой порубочных остатков).

Результаты исследования. Требующие сгребания на территориях ЛИО порубочные остатки представляют собой преимущественно срезанную разновозрастную древесно-кустарниковую растительность в виде неразделённых стволов (различной длины и диаметра) с сучьями, ветками и листвой [32], а также элементов такой растительности в виде отдельных вершин, сучьев, ветвей, стволов, пней, корневых систем. Размеры (фракционность) порубочных остатков, образующихся на территориях ЛИО, варьируются в достаточно широких пределах. Так, срезаемые с отделением от корневой системы высокорослые деревья и кустарники нередко разделяются (и, впоследствии, сгребаются) на отдельные части длиной 1,5...2 м с оставлением на них ветвей и листвьев. Нежелательные мелколесье, подлесок и поросль, также срезаемые отделением от корневой системы, на отдельные части не разделяются и сгребаются в состоянии «как есть», при этом их длина варьируется преимущественно в диапазоне 0,7...1,5 м. В то же время щепа, представляющая собой древесные элементы с преимущественными размерами фракций от 5 до 70 мм (длина) и до 30 мм (толщина), образуется путём преобразования порубочных остатков в рубильных (измельчающих) машинах и впоследствии подлежит разбрасыванию по территории расчищенного от НДКР участка или вывозу с территории данного участка.

Если сгребаемые порубочные остатки (ПБО) имеют достаточно большие размеры ($l_{\text{ПБО}} \geq (0,5...1) \cdot B_R$, где

$l_{\text{ПБО}}$ – наибольший размер, а именно, длина или размах веток по их наиболее удалённым точкам от ствола/стволов сгребаемых порубочных остатков), то формирование объёма ПБО (характеризуемого определённой длиной, шириной и высотой) перед лесными граблями не вызывает особых затруднений. В этих случаях величины объёма V_R вороха порубочных остатков, формируемых лесными граблями (рис. 2), зависят от технических и эксплуатационных параметров осуществляющей технологической операции сгребания, в том числе – от мастерства оператора базового технического средства с установленными на нём лесными граблями, характеристик лесных граблей (B_R и H_R – соответственно ширина и высота лесных граблей, м; Z и B_Z – количество и ширина зубьев лесных граблей; l_1 и l_2 – длины верхней и нижней частей зуба лесных граблей, м; α_1 и α_2 – углы наклона верхней и нижней частей зуба лесных граблей, град.) и порубочных остатков (ρ – угол внутреннего трения свежесрезанной древесины (порубочных остатков) в покое, град.), иных факторов формирования общего сгребаемого объёма порубочных остатков (h_5 – расстояние от точки взаимодействия лесных граблей с очищаемой поверхностью до точки контакта по высоте крайнего по ширине зуба с порубочными остатками (высота валика порубочных остатков), м; l_6 (l_7) – ширина валика порубочных остатков, м).

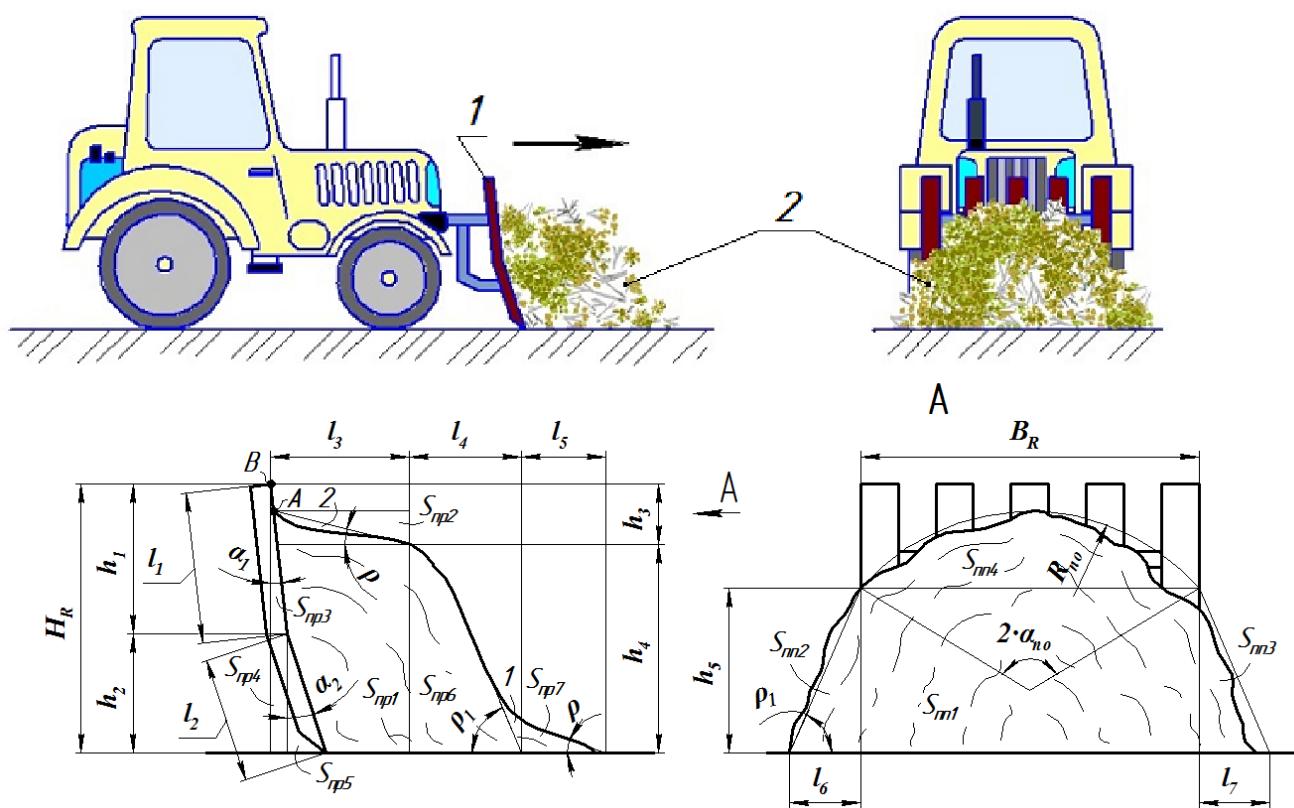


Рис. 2. Ворох волочения, формируемый лесными граблями

Однако с уменьшением размера $l_{ПБО}$ возрастает вероятность неполного сгребания порубочных остатков ввиду увеличивающейся возможности их проникновения между двумя соседними зубьями лесных граблей.

Эффективность сгребания порубочных остатков будет наибольшей, если каждый экземпляр срезанной (вырубленной и т. д.) растительности своим наибольшим размером $l_{ПБО}$ будет перекрывать расстояние между двумя соседними зубьями B_{pr} лесных граблей, а следовательно, должно обеспечиваться следующее минимальное граничное условие: 5

$$l_{ПБО} \geq B_{pr} = \frac{B_R - Z \cdot B_Z}{Z - 1}. \quad (1)$$

При соблюдении указанного условия из отдельных экземпляров порубочных остатков будет формироваться некоторый объём ПБО, динамически увеличивающийся в процессе работы базового транспортного средства и увлекаемый лесными граблями в направлении их движения.

При несоблюдении указанного условия возможно проникновение экземпляра ПБО между двумя соседними зубьями лесных граблей. Указанное проникновение априори становится ещё более вероятным в случае отсутствия у большинства элементов, составляющих основную массу порубочных остатков, узлов разветвления, которыми указанные элементы могут, взаимодействуя с зубьями граблей или друг с другом, образовывать постоянные или временные связи, обеспечивающие их совместное увлечение лесными граблями в направлении их движения.

С учётом вышеизложенного оценить эффективность работы лесных граблей можно применением такого показателя, как коэффициент непроницаемости граблей φ_R – это отношение количества экземпляров $N_{ПБО}$ порубочных остатков, сгребленных (собранных) с определённой площади S ($м^2$), к количеству всех экземпляров $\sum N_{ПБО}$ порубочных остатков, находившихся на указанной площади до начала сгребания (сбора) ПБО с плотностью их скапливания $q_{ПБО}$ ($шт./м^2$):

$$\varphi_R = \frac{N_{ПБО}}{\sum N_{ПБО}} = \frac{N_{ПБО}}{q_{ПБО} \cdot S}. \quad (2)$$

Выявление коэффициента непроницаемости граблей φ_R осуществляется в зоне влияния лесных граблей (пространстве, в котором обнаруживается воздействие лесных граблей на порубочные остатки, но из которого указанные остатки ещё могут выйти) с учётом зоны действия лесных граблей (пространстве, в котором порубочные остатки увлекаются в направлении движения лесных граблей).

Вышеприведённая зависимость может быть применена для оценки эффективности работы лесных граблей на этапах их опытно-производственной и промышленной эксплуатации. При математическом моделировании оценки эффективности работы лесных граблей (когда отсутствуют данные о количестве сгребленных с определённой площади экземпляров ПБО и количестве всех

экземпляров порубочных остатков, находящихся на указанной площади до начала сгребания) коэффициент непроницаемости граблей φ_R может быть определён по формуле:

$$\varphi_R = \left(\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_{\partial}} \psi_{Rij}}{N_{\partial}} \right) \cdot \prod_{r=1}^m K_{ПБОr}, \quad (3)$$

где $K_{ПБОr}$ – коэффициенты влияния на непроницаемость порубочных остатков.

Принимая во внимание зависимость для определения расстояния B_{pr} (мм) между зубьями лесных граблей, (1) факт проникновения ψ_{Rij} одиночно-несвязанного экземпляра порубочных остатков между двумя соседними зубьями лесных граблей может быть математически описан следующим образом:

$$\begin{cases} f(\alpha_{nПБО})_i = \left| \frac{l_{ПБО} \cdot \sin \alpha_{nПБОi}}{B_R - Z \cdot B_Z} \cdot (Z - 1) \right| \\ f(\alpha_{nПБО})_i < 1: \psi_{Rij} = 0 \\ f(\alpha_{nПБО})_i \geq 1: \psi_{Rij} = 1 \end{cases}, \quad (4)$$

где $f(\alpha_{nПБО})_i$ – функция вероятностного положения одиночно-несвязанного экземпляра порубочных остатков в зависимости от угла $\alpha_{nПБОi}$ (град.) расположения оси j -го экземпляра порубочных остатков в i -м направлении по отношению к общему направлению сгребания (сбора) порубочных остатков при количестве N_{∂} возможных положений каждого j -го экземпляра порубочных остатков и количества таких экземпляров n . При математическом моделировании коэффициента непроницаемости граблей φ_R величина функции $f(\alpha_{nПБО})_i$ определялась с применением принципа равновероятностного расположения оси каждого j -го экземпляра порубочных остатков в i -м направлении.

Выявленный факт проникновения ($\psi_{Rij} = 0$) одиночно-несвязанного экземпляра порубочных остатков между двумя соседними зубьями лесных граблей равнозначен физическому оставлению такого экземпляра ПБО на очищаемой территории. Выявленный факт увлечения ($\psi_{Rij} = 1$) одиночно-несвязанного экземпляра порубочных остатков лесными граблями равнозначен физическому перемещению такого экземпляра ПБО по очищаемой территории. При этом частичное или практически полное проникновение экземпляра ПБО между зубьями лесных граблей при одновременном и уверенно-стабильном увлечении данного экземпляра в направлении сгребания (сбора) порубочных остатков соответствует $\psi_{Rij} = 1$.

На возможность непроникновения экземпляров порубочных остатков между двумя соседними зубьями лесных граблей оказывают влияние целый ряд нижеследующих факторов, которые могут быть оценены соответствующими коэффициентами влияния $K_{ПБО}$, (3):

1. Наличие ветвистости порубочных остатков определяется развитостью системы сучьев и/или ветвей на каждом j -м экземпляре порубочных остатков в их общем сгребаемом объёме. Для рассматриваемых видов ПБО, образуемых удалением кустарника, мелколесья, подлеска и поросли, в соответствии с наиболее распространёнными технологическими процессами разделение на части отделённых от корневых систем экземпляров указанной нежелательной растительности (а равно как и удалённых с корневыми системами из мест их произрастания) осуществляется крайне редко, ввиду чего порубочные остатки чаще всего сгребаются в своём первозданном виде (с листвой, ветками и сучьями, соединёнными со стволов/стволами растительности). Рассмотренный фактор может быть оценён коэффициентом ветвистости порубочных остатков $K_{ПБО1}$.

2. Взаимодействие с зубьями лесных граблей определяется размерами системы сучьев и/или ветвей на каждом j -м экземпляре порубочных остатков в их общем сгребаемом объёме, в частности, размаху веток (диаметру кроны) $D_{ПБО}$ (м) экземпляра порубочных остатков и углом взаимодействия указанного экземпляра с зубьями $\alpha_{\varepsilon ПБО} = \arctg(D_{ПБО} / 2 \cdot l_{ПБО})$ (рис. 3).

Даже при длине основного ствола экземпляра порубочных остатков $l_{ПБО} < B_{pr}$, возможно увлечение в направлении сгребания такого ПБО зубом (соседними зубьями) лесных граблей ввиду их обоюдного взаимодействия. Рассмотренный фактор может быть оценён коэффициентом взаимодействия порубочных остатков с зубьями $K_{ПБО2}$.

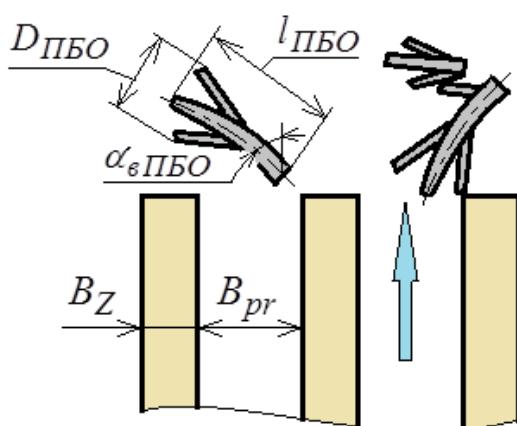


Рис. 3. Схема взаимодействия ветвей и сучьев порубочных остатков с зубьями лесных граблей

3. Взаимодействие с соседними экземплярами порубочных остатков определяется возможностью временного (на несколько секунд) или условно-постоянного

(на более продолжительный период времени, вплоть до окончания перемещения формируемого объёма порубочных остатков по очищаемой территории) сцепления элементов соседних экземпляров ПБО между собой. Указанное сцепление обуславливает образование групп связанных между собой экземпляров порубочных остатков, увлекаемых лесными граблями в направлении сгребания. Рассмотренный фактор может быть оценён коэффициентом сцепления элементов порубочных остатков $K_{ПБО3}$.

4. Прочностные характеристики экземпляров порубочных остатков определяют возможность сопротивляться воздействию внешних нагрузок (усилий от лесных граблей, реакций противодействия от соседних экземпляров ПБО) без излома (гибкость, антипод – сухость), приводящего в случае его возникновения к изменению (уменьшению) габаритного размера (длины $l_{ПБО}$) экземпляра ПБО, и, как следствие, увеличению вероятности проникновения такого одиночно-несвязанного экземпляра порубочных остатков между двумя соседними зубьями лесных граблей. Рассмотренный фактор может быть оценён коэффициентом гибкости порубочных остатков $K_{ПБО4}$.

Результаты имитационного моделирования. При имитационном моделировании коэффициента непроницаемости φ_R по формуле (3) были приняты следующие представительные значения параметров лесных граблей с ломанным профилем зубьев (распространённых в отечественном машиностроении, типа: устройство ЗПИ, грабли уборочные ВО-1, оборудование уборочное лесохозяйственное ОУЛ-24;) (рис. 1, а): ширина захвата $B_R = 2390$ мм и ширина зубьев $B_Z = 80$ мм. Количество зубьев принималось стабильно неизменным ($Z = 5$; рис. 4, а) или варьируемым ($Z = 4 \dots 20$; рис. 4, б). Угол расположения оси j -го экземпляра порубочных остатков в i -м направлении варьировался в диапазоне $\alpha_{nПБОi} = 0 \dots 360^\circ$ с дискретностью 1° . Принималось, что на каждом j -м экземпляре свежесрезанных (в пределах 2...5 дней) порубочных остатков в их общем сгребаемом объёме существует развитая система сучьев и/или ветвей, при этом диаметр кроны $D_{ПБО}$ соотносится с длиной основного ствола экземпляра порубочных остатков $l_{ПБО}$ (принятых в наиболее вероятном диапазоне 650...1250 мм и дискретностью 150 мм) как 35:100, что обеспечивает возможность образования групп связанных между собой экземпляров порубочных остатков, увлекаемых лесными граблями в направлении сгребания.

На рис. 4, а, б представлены результаты имитационного моделирования коэффициента непроницаемости лесных граблей φ_R в виде номограмм определения данного параметра в зависимости от интервала между двумя соседними зубьями B_{pr} , количества зубьев Z и длины $l_{ПБО}$ порубочных остатков.

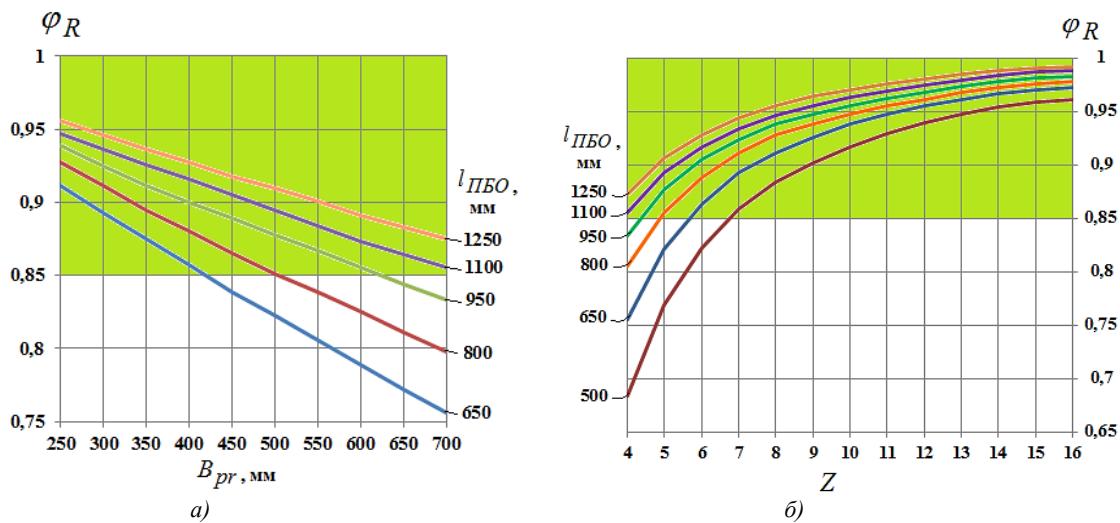


Рис. 4. Номограммы определения коэффициента непроницаемости φ_R лесных граблей в зависимости от интервала между двумя соседними зубьями B_{pr} , количества зубьев Z и длины l_{PBO} порубочных остатков

Результаты имитационного моделирования коэффициента непроницаемости φ_R позволили установить, что во всём диапазоне увеличения интервала между двумя соседними зубьями B_{pr} лесных граблей коэффициент φ_R имеет тенденцию к снижению с аппроксимацией линейным трендом и величиной достоверности такой аппроксимации $R^2 = 0,992 \dots 0,996$. Уменьшение длины порубочных остатков в 1,92 раза приводит к ускорению снижения непроницаемости с 91 % до 82 % в исследованном диапазоне B_{pr} . В области малых значений интервала $B_{pr} = 100 \dots 250$ мм при изменении длины порубочных остатков непроницаемость лесных граблей различается незначительно ($\varphi_R = 92 \dots 96$ %), в то время как при больших значениях $B_{pr} = 600 \dots 700$ мм различия в непроницаемости φ_R достигают 12 % и более. Для выявленных репрезентативных значений параметров лесных граблей российского и белорусского производства при наиболее вероятном интервале между двумя соседними зубьями $B_{pr} \approx 500$ мм коэффициент непроницаемости варьируется в диапазоне $\varphi_R = 0,82 \dots 0,91$.

Во всём диапазоне увеличения количества зубьев Z лесных граблей коэффициент φ_R имеет тенденцию к увеличению с аппроксимацией полиномиальными линиями 4-го порядка и величиной достоверности такой аппроксимации $R^2 = 0,993 \dots 0,996$. В области малых значений количества зубьев ($Z = 4 \dots 5$) непроницаемость лесных граблей весьма различается ($\varphi_R = 68 \dots 87$ %) в зависимости от длины l_{PBO} порубочных остатков. С увеличением густоты лесных граблей (при количестве зубьев $Z \geq 14$) непроницаемость лесных граблей с изменением длины

порубочных остатков различается незначительно ($\varphi_R = 95 \dots 98$ %).

Заключение. Результаты математического и имитационного моделирования непроницаемости лесных граблей позволяют сделать следующие выводы и рекомендации.

Для оценки эффективности работы лесных граблей целесообразно использовать коэффициент непроницаемости граблей, определяемый как отношение количества экземпляров порубочных остатков, сграбленных (собранных) с определённой площади (м^2), к количеству всех экземпляров порубочных остатков, находившихся на указанной площади до начала сграбливания (сбора) ПБО, с учётом плотности (шт./м^2) их скапливания.

Показано, что для распространённых в отечественном машиностроении лесных граблей с ломанным профилем зубьев при наиболее вероятном интервале между двумя соседними зубьями около 500 мм коэффициент непроницаемости граблей варьируется в диапазоне 0,82...0,91.

В качестве рекомендаций производству можно отметить следующее.

Для очистки территорий с преобладающей длиной порубочных остатков $l_{PBO} \geq 1$ м нецелесообразно применение перспективных конструкций лесных граблей с количеством зубьев $Z \geq 9$ ввиду незначительного изменения непроницаемости данных технических средств.

Для очистки территорий с преобладающей длиной порубочных остатков $l_{PBO} \leq 500 \dots 800$ мм нецелесообразно применение перспективных (а равно как и существующих) конструкций лесных граблей с количеством зубьев $Z = 4 \dots 5$ ввиду недостаточной непроницаемости данных технических средств ($\varphi_R = 68 \dots 85$ %).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876>.

Литература

1. Васильев С.М., Гулюк Г.Г., Домашенко Ю.Е. [и др.] Технологические схемы удаления древесно–кустарниковой растительности при проведении культуртехнических работ // Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации. 2018. № 4(32). С. 126–145. DOI 10.31774/2222-1816-2018-4–126–145.
2. Орлова О.И. Культуртехнические работы: расчистка и восстановление залежных земель от древесно–кустарниковой растительности // Карельский научный журнал. 2015. № 3(12). С. 106–108.
3. Васильченко А.П., Шепелев А.Е. Анализ устройств для проведения культуртехнических работ по удалению древесно–кустарниковой растительности на землях сельскохозяйственного назначения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2022. № 3(87). С. 100–108.
4. Тикачев В.И. Машины для измельчения древесины // ЛесПромИнформ. 2010. № 2(68). с. 92–104.
5. Тикачев В.И. Мульчеры и измельчители пней // ЛесПромИнформ. 2010. № 4(70). с. 76–81.
6. Ширинин Ю.А., Тарасова О.Г., Кренев А.В. Технологический регламент на разработку лесных участков под линейные объекты // Изв. вузов. Лесной журнал. 2014. № 4 (340). С. 35–43
7. Ивашинев М.В. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно–кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01 / Ивашинев Михаил Валерьевич. – Петрозаводск: 2019. – 36 с.
8. Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, vol. 28, № 8, pp. 758–774. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299
9. Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Bykovskiy M.A. et al. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging. Croatian Journal of Forest Engineering, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531
10. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е. [и др.] Технология и система машин для разработки трасс линейных объектов // Энергия: экономика, техника, экология. 2019. № 10. С. 62–68.
11. Moraes G.F., Santos J.d.S.G., Han D. [et al] Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems // Agriculture. 2023. Vol. 13, p. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416
12. Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. № 27(6). DOI: 10.18698/2542–1468–2023–6–139–150.
13. Трушевский П.В., Должиков И.С., Григорьев И.В. [и др.] Определение доступного запаса порубочных остатков на лесосеке после сплошной рубки по скандинавской технологии // Resources and Technology. 2024. № 21(3). С. 57–74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863.
14. Мартынова Н.Б. Разработка кустарниковых грабель для рекультивации земель // Материалы VII Национальной конференции по итогам научной работы в области лесного дела. Саратов: Вавиловский университет, 2025. С. 16–19.
15. Мартынова Н.Б., Балабанов В.И., Абдулмажидов Х.А. Машины и оборудование для производства культуртехнических работ. М: Издательство «Перо», 2021. 84 с.
16. Pergola M.T., Saulino L., Castellaneta M. [et al] Towards sustainable management of forest residues in the southern Apennine Mediterranean mountain forests: a scenario-based approach. Annals of Forest Science, 79, 14 (2022). DOI: 10.1186/s13595-022-01128-w
17. Dickens D., Morris L., Clabo D. [et al] Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations // Forests. 2020. Vol. 11, p. 799. DOI: 10.3390/f11080799
18. Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes // Trees, Forests and People. 2022, Vol. 7. DOI: 100186. 10.1016/j.tfp.2021.100186.
19. Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs // BIO Web of Conferences. 2024, Vol. 145, p. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.
20. Kühmaier M., Grünberg J. The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. Journal of Sustainable // Forestry. 2025. Vol. 44, pp. 1–21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.
21. Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R. Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States // International Journal of Forest Engineering. 2024, Vol. 35: pp. 1–16. DOI: 10.1080/14942119.2023.2299158.
22. Маганов И.А., Тихонов Е.А., Петруша С.В. [и др.] Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии // Лесотехнический журнал. 2024. № 14(3). С. 5–22. DOI: 10.34220/issn.2222–7962/2024.3/1.
23. Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S. [et al] Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2024, Vol. 11, pp. 745–753. DOI: 10.18280/mmep.110319.
24. Megookin C., Charchi N., Mendonça A. [et al] Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source // Cleaner Waste Systems. 2025, Vol. 11. p. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.
25. Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A. [et al] Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis // Current Forestry Reports. 2022, Vol. 3. DOI: 10.1007/s40725–021–00156–5.
26. Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan // Forests. 2025, Vol. 16(5), p. 734. DOI: 10.3390/f16050734.
27. Рябухин П.Б., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2(392). С. 88–105. DOI: 10.37482/0536–1036–2023–2–88–105.
28. Fernandez–Lacruz R., Edlund M., Bergström D. [et al] Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study // International Journal of Forest Engineering. 2020, Vol. 32, pp. 1–10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.
29. Nilsson D., Grönlund Ö. Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study // International Journal of Forest Engineering. 2024, Vol. 35(1), p. 1–14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.
30. Laitila J., Väätäinen K. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads // Silva Fennica. 2020, Vol. 54(5), p. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.
31. Laitila J., Väätäinen K. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges // International Journal of Forest Engineering. 2021, Vol. 32(2). DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.

32. Мохирев А.П. Эффективное освоение древесных ресурсов лесного региона: оценка, заготовка, переработка: монография / А.П. Мохирев, С.О. Медведев, М.А. Зырянов. – Красноярск: Амальгама, 2019. – 240 с.

References

- Vasiliev S.M., Gulyuk G.G., Domashchenko Yu.E. [et al.] Technological schemes for removing trees and shrubs during land improvement works // Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Improvement Problems. 2018. № 4(32). pp. 126–145. DOI 10.31774/2222-1816-2018-4-126–145.
- Orlova O.I. Land improvement works: clearing and restoration of fallow lands from trees and shrubs // Karelian scientific journal. 2015. № 3(12). pp. 106–108.
- Vasilchenko A.P., Shepelev A.E. Analysis of Equipment for Carrying Out Tillage and Technical Work on Removing Trees and Shrubs on Agricultural Lands // Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2022. № 3 (87). pp. 100–108.
- Tikachev V.I. Wood Chipping Machines // LesPromInform. 2010. № 2 (68). pp. 92–104.
- Tikachev V.I. Mulchers and Stump Grinders // LesPromInform. 2010. № 4 (70). pp. 76–81.
- Shirnin Yu.A., Tarasova O.G., Krenev A.V. Technological Regulations for the Development of Forest Areas for Linear Facilities // News of Universities. Forest Journal. 2014. № 4 (340). pp. 35–43
- Ivashnev, M.V. Scientific Foundations for Improving Machines for Removing Trees and Shrubs with Continuous Tractor Motion: Abstract of a Doctor of Engineering Sciences (D.Sc.): 05.21.01 / Ivashnev, Mikhail Valerievich. – Petrozavodsk: 2019. – 36 p.
- Gerasimov, Y., Senko, S., Karjalainen, T. Prospects of Forest Road Infrastructure Development in Northwest Russia with Proven Nordic Solutions. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, Vol. 28, № 8, pp. 758–774. DOI: 10.1080/02827581.2013.838299
- Karpachev, S.P., Zaprudnov, V.I., Bykovskiy, M.A. et al. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging. Croatian Journal of Forest Engineering, 2020, Vol. 41, № 1, pp. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531
- Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E. [et al.] Technology and system of machines for cutting the routes of linear objects // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2019. № 10. pp. 62–68.
- Morais G.F., Santos J.d.S.G., Han D. [et al.] Agricultural Machinery Adequacy for Handling the Mombaça Grass Biomass in Agroforestry Systems // Agriculture. 2023. Vol. 13, p. 1416. DOI: 10.3390/agriculture13071416
- Platonov, A.A. Forest rakes: purpose, scope, classification // Forestry Bulletin. 2023. № 27(6). DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139–150.
- Trushevsky, P.V., Dolzhikov, I.S., Grigoriev, I.V. [et al.] Determining the available stock of logging residues in a felling area after clear-cutting using Scandinavian technology // Resources and Technology. 2024. № 21(3). pp. 57–74. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7863.
- Martynova, N.B. Developing a Shrub Rake for Land Reclamation // Proceedings of the VII National Conference on the Results of Scientific Work in Forestry. Saratov: Vavilov University, 2025. pp. 16–19.
- Martynova, N.B., Balabanov, V.I., Abdulmazhidov, H.A. Machines and Equipment for Land Reclamation Work. Moscow: Pero Publishing House, 2021. 84 p.
- Pergola, M.T., Saulino, L., Castellaneta, M. [et al.] Towards Sustainable Management of Forest Residues in the Southern Apennine Mediterranean Mountain Forests: a Scenario-Based Approach. Annals of Forest Science, 79, 14 (2022). DOI: 10.1186/s13595-022-01128-w
- Dickens D., Morris L., Clabo D. [et al] Pine Straw Raking and Growth of Southern Pine: Review and Recommendations // Forests. 2020. Vol. 11, p. 799. DOI: 10.3390/f11080799
- Elliot W., Rhee H. Impacts of Forest Biomass Operations on Forest Hydrologic and Soil Erosion Processes // Trees, Forests and People. 2022, Vol. 7. DOI: 100186. 10.1016/j.tfp.2021.100186.
- Fokin S., Shportko O., Druchinin D. On shredding of wood raw materials with knives of different designs // BIO Web of Conferences. 2024, Vol. 145, p. 03012. DOI: 10.1051/bioconf/202414503012.
- Kühmaier M., Grünberg J. The Relevance of Criteria and Indicators for Sustainable Timber Harvesting from the Perspective of Different Stakeholders. Journal of Sustainable // Forestry. 2025. Vol. 44, pp. 1–21. DOI: 10.1080/10549811.2025.2513229.
- Louis L.T., Daigneault A., Kizha A.R. Constraints and opportunities in harvesting woody biomass: perspectives of foresters and loggers in the Northeastern United States // International Journal of Forest Engineering. 2024, Vol. 35: pp. 1–16. DOI: 10.1080/1494219.2023.2299158.
- Maganov I.A., Tikhonov E.A., Petrushka S.V. [et al.] Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2024. № 14(3). pp. 5–22. DOI: 10.34220/issn.2222–7962/2024.3/1.
- Kunickaya O., Zyryanov M., Medvedev S. [et al.] Efficient Technologies for Harvesting and Reutilizing Logging Residues in Russia: A Sustainable Forestry Approach // Mathematical Modeling of Engineering Problems. 2024, Vol. 11, pp. 745–753. DOI: 10.18280/mmep.110319.
- Mcgookin C., Charchi N., Mendonça A. [et al] Green waste, an untapped energy source? Reviewing the prospect of green waste as a biomass energy source // Cleaner Waste Systems. 2025, Vol. 11. p. 100273. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100273.
- Louis L.T., Kizha A.R., Daigneault A. [et al] Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis // Current Forestry Reports. 2022, Vol. 3. DOI: 10.1007/s40725–021–00156–5.
- Yoshimura T., Suzuki Y., Sato N. Application of System Dynamics Simulation to Assess System Productivity of Forest Harvesting Systems: A Case Study from Japan // Forests. 2025, Vol. 16(5), p. 734. DOI: 10.3390/f16050734.
- Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Justification of Technological Processes and Machine Systems for Forestry Operations // News of Higher Educational Institutions. Forestry Journal. 2023. № 2(392). pp. 88–105. DOI: 10.37482/0536-1036–2023–2–88–105.
- Fernandez-Lacruz R., Edlund M., Bergström D. [et al] Productivity and profitability of harvesting overgrown roadside verges – a Swedish case study // International Journal of Forest Engineering. 2020, Vol. 32, pp. 1–10. DOI: 10.1080/14942119.2020.1822664.
- Nilsson D., Grönlund O. Productivity and cost of harvesting roadside brushwood and small trees in Sweden: a simulation study // International Journal of Forest Engineering. 2024, Vol. 35(1), p. 1–14. DOI: 10.1080/14942119.2024.2336686.
- Laitila J., Väätäinen K. Productivity of harvesting and clearing of brushwood alongside forest roads // Silva Fennica. 2020, Vol. 54(5), p. 21. DOI: 10.14214/sf.10379.
- Laitila J., Väätäinen K. Productivity and cost of harvesting overgrowth brushwood from roadsides and field edges // International Journal of Forest Engineering. 2021, Vol. 32(2). DOI: 10.1080/14942119.2021.1903790.
- Mokhirev A.P. Efficient development of wood resources in the forest region: assessment, harvesting, processing: monograph / A.P. Mokhirev, S.O. Medvedev, M.A. Zyryanov. – Krasnoyarsk: Amalgama, 2019. – 240 p.