

УДК 630\*377.21-047.37

**А. О. Шошин**

Белорусский государственный технологический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ  
ТРЕЛЕВОЧНОЙ УСТАНОВКИ В РАВНИННЫХ УСЛОВИЯХ**

Выполненные экспериментальные исследования раскрывают новые особенности заготовки древесины с помощью канатных трелевочных установок. Предмет исследований – усилия в тяговом канате. Испытания были направлены на изучение отдельных операций первичного транспорта древесины на лесосеке и полного цикла в целом. Объектом исследования выступала установка МТК-431 с неподвижным несущим канатом.

Выполнялся полный цикл трелевки пачки от подъема груза возле места чоковойки до разгрузки пачки на верхнем складе. Проводилось сравнение усилий в тяговом канате при перемещении пачки по трелевочному коридору волоком и в полуподвешенном положении. Получены данные о влиянии лобовых сопротивлений в виде пней при подтрелевке к трелевочному коридору и лежащих лесоматериалов при трелевке по трелевочному коридору.

Было определено, что перемещение лесоматериалов волоком на трелевочном коридоре без лобовых препятствий более эффективно, чем в полуподвешенном положении. Выделены особенности перемещения лесоматериалов на подтрелевке и установлено, что перемещение пачки от места валки к оси трелевочного волока сопряжено с преодолением препятствий в виде пней, которые создают значительные усилия, многократно превышающие массу трелеваемой пачки. Заданы направления для дальнейшего развития проблемного вопроса первичного транспорта древесины на заболоченных лесных территориях.

**Ключевые слова:** тяговый канат, трелевка, усилие, лесоматериал, трелевочный коридор.

**Для цитирования:** Шошин А. О. Экспериментальные исследования мобильной канатной трелевочной установки в равнинных условиях // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13.

**A. O. Shoshyn**

Belarusian State Technological University

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE CABLE YARDER  
IN FLAT CUTTING AREAS**

The experimental researches carried out reveal new features of wood harvesting with the help of cable skidders. The subject of the research was the effort in the traction rope and the tests were directed both to the study of individual operations and to the study of the complete cycle of the primary transport of wood in the cutting area. The object of the study was the MTK-431 installation with a fixed carrier rope. A full cycle of hauling a pack was carried out from lifting the load near the place of chocking to unloading the pack in the upper warehouse. A comparison was made of the efforts in the traction rope when moving the bundle along the skidding corridor by drag and in a semi-suspended position. Data were obtained on the influence of frontal resistance in the form of stumps when skidding to the skidding corridor and lying timber during skidding along the skidding corridor. It was determined that the movement of timber by dragging on a logging corridor without frontal obstacles is more efficient than in a semi-suspended position. The peculiarities of the movement of timber on skidding are highlighted and it is established that the movement of a pack from the place of felling to the axis of the skidding portage is associated with overcoming obstacles in the form of stumps, which create significant forces many times greater than the mass of the skidding pack. Directions for further development of the problematic issue of the primary transport of timber in swampy forest areas have been set.

**Keywords:** mainline, yarding, pulling force, timber, skyroad.

**For citation:** Shoshyn A. O. Experimental researches of the cable yarder in flat cutting areas. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 121–132. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-13 (In Russian).

**Введение.** Анализ экспериментальных исследований [1–15] по изменению усилий в тяговом канате при работе трелевочных установок в горной местности показал, что нельзя в полной мере

использовать опыт работы в пересеченной местности для равнинных условий. Достаточно сложную задачу представляло собой выявление особенностей изменения усилий при прохождении

различных этапов пути, так как в данных исследованиях трелевочный коридор пролегал через пере-сеченную местность с большим перепадом высот. В таких условиях было сложно определить основ-ной фактор воздействия.

На основании всех изученных материалов можно сказать, что только Ходосовский М. В. про-водил исследования работы канатных трелевоч-ных установок в равнинной заболоченной местно-сти [4] и выявил, что увеличение высоты подъема вершин пачки напрямую влияет на повышение проходимости пачки при трелевке.

Экспериментально установлено, что усилие в тяговом канате возрастает при стопорении пачки с кареткой [5, 6, 7]. Матвеев Э. Н. устано-вил [5], что коэффициент динамичности при стопорении с кареткой при подъеме пачки со скоростью 0,28–1,5 м/с изменяется в диапазоне 1,04–1,39. При этом наибольшие значения соот-ветствовали меньшим объемам пачки.

В публикации [1] исследовались изменения усилий в несущем канате при выполнении трелевки «с горы». Датчик силы был установлен у верхней тыловой опоры между несущим канатом и блоч-ным узлом. Результаты измерений показали, что подтрелевка древесины к несущему канату оказы-вает наибольшее влияние на динамику величины усилия по сравнению с другими операциями.

Spinelli R. и др. [2] исследовали влияние со-противления пачки при прохождении пней, раз-грузке, подъеме пачки и др. Установлено, что дан-ные сопротивления могут вызывать резкие скачки усилий в несущем канате порядка 40–70 кН.

Исследования усилия в несущем канате с по-следующим использованием полученных резуль-татов при моделировании аналогичного нагруже-ния в компьютерных пакетах SkylineXL и ANSYS [3] позволило достичь минимальной погрешности в 7,24%. Однако аналогичных исследований для тягового каната выполнено не было.

Белая Н. М. исследовала влияние процесса заготовки древесины воздушно-трелевочными

установками на усилия в тяговом и несущем ка-натах. Установлено, что наибольшие усилия в тяговом канате возникают в начальный период времени при подтрелевке [8, 9].

Алышевым И. Ф. были выведены эмпириче-ские зависимости (линейные и квадратичные) коэффициента сопротивления (трения скольже-ния) [10] в зависимости от породы и способа трелевки. Наименьшее значение коэффициента приходилось на трелевку хлыстов без сучьев – 0,38–0,41, при трелевке пачек с сучьями макси-мальные значения достигали 1,3–1,6.

Коротяевым Л. В. [11] проведена обширная работа по определению сопротивлений, возни-кающих при трелевке, однако не было уделено сосредоточенного внимания непосредственно самым опасным и нестабильным режимам ра-боты – при преодолении предметом труда пней.

Журавлев Н. А. [12] установил, что частота колебания усилий в тяговом канате при трелевке пачки в полуподвесном положении при скоро-сти 2 м/с находится в диапазоне 0,26–0,39 с и от-метил, что при увеличении жесткости каната ча-стота собственных колебаний возрастает.

Всеми авторами был определен автоколеба-тельный характер изменения усилия в тяговом канате [1–3, 5–12].

**Основная часть. Методика проведения поле-вых испытаний по исследованию усилий в тяго-вом канате мобильной канатной трелевочной установки.** Цель экспериментальных исследова-ний – получение достаточного количества опытных данных, характеризующих процесс работы МКТУ в условиях заболоченного лесфонда, и вы-работка рекомендаций по эффективному освоению труднодоступных лесных территорий. Предмет исследования – усилия в тяговом канате канатной трелевочной установки. Объект исследования – мо-бильная канатная трелевочная установка МТК-431 и трелевочный трактор ТТР-401 производства Минского тракторного завода. Технические харак-теристики МТК-431 представлены в таблице.

Технические характеристики МТК-431

Характеристика	Показатель
Базовая машина	БЕЛАРУС 1221, лесная модификация
Мощность двигателя, кВт	90
Характеристика	Показатель
Рабочие канаты	Несущий, тяговый, возвратный
Грузоподъемность, кг	2000
Общая масса, кг	8400
Максимальное расстояние трелевки, м	200
Усилие натяжения несущего каната, кг	5000
Управление	Электрогидравлическое с выносного пульта
Технологическое оборудование	Каретка вытяжная механическая, трелевочная мачта

Общий вид установки и трелевочной каретки представлены на рис. 1.

В соответствии с целью исследования, методика включала следующие этапы:

1) изучение характера изменения усилий в тяговом канате при выполнении трелевки древесины вдоль трелевочного коридора полуподвесным способом;

2) изучение характера изменения усилий в тяговом канате при смене способа перемещения из положения волоком в полуподвесное положение;

3) изучение особенностей взаимодействия хлыста с лобовым препятствием в виде пня и его влияние на усилие в тяговом канате при подтрелевке волоком.

Исследования № 1 и 2 выполнялись на установке МТК-431. Исследование № 3 выполнялось с помощью трелевочного трактора ТТР-401. Исследования усилий в тяговом канате установки МТК-431 и трелевочного трактора ТТР-401 проводились в весенне-летний период.

В процессе проведения исследований по определению усилий в тяговом канате в качестве измерительного оборудования и вспомогательного инструмента использовались:

– восьмиканальный измерительный усилитель Spider 8, служащий для преобразования сигнала от датчиков в цифровой вид (рис. 2, а);

– переносной компьютер (ноутбук), являющийся носителем специализированного программного обеспечения для Spider 8 – Catman, хранилищем полученных экспериментальных

данных и используемый для визуального отображения процесса измерения в реальном времени (рис. 2, а);

– инвертор для преобразования напряжения из 12 в 220 В, необходимого для работы ноутбука и усилителя (рис. 2, а);

– датчик силы НВМ U9B, применяемый для измерения величины силы тяги при трелевке (рис. 2, б).

В качестве вспомогательного инструмента использовались:

– мерная линейка 30 м;

– кабельный удлинитель с четырьмя жилами;

– автомобильный аккумулятор;

При определении усилия в тяговом канате регистрировались сигналы, получаемые от датчика силы НВМ U9B и преобразованные с помощью многоканального измерительного усилителя сигнала НВМ Spider 8, который подключался к ноутбуку с соответствующим программным приложением Catman. Полученные сигналы отображались с шагом в 0,02 с в пакете MS Excel. Для соединения напрямую датчика силы НВМ U9B с измерительным комплексом применялся кабельный удлинитель с четырьмя жилами. Питание измерительного комплекса осуществлялось с помощью автомобильного аккумулятора. Для определения «чистого» тягового усилия (без потерь на трение в блоках, перемещение самого каната), затрачиваемого на перемещения лесоматериалов, датчик силы U9B устанавливался между цепью чокера и замком для цепи, продетым в собирающий канат (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Технологическое оборудование МТК-431:

а – каретка; б – мачта





Рис. 2. Измерительное оборудование:  
 а – переносной компьютер, восьмиканальный измерительный усилитель Spider 8, аккумулятор, инвертор; б – датчик силы U9B

Измерения параметров хлыстов, а также линейные размеры испытательного участка производились 30-метровой рулеткой.

Исследование лобовых сопротивлений наиболее актуально в условиях заболоченного лесфонда, так как этот аспект является характерным для природно-производственных условий Республики Беларусь. Основным лобовым сопротивлением, значительно влияющим на трудозатраты при трелевке, являются высокие пни на пасеке.

**Результаты исследования изменения усилия в тяговом канате при перемещении пачки по трелевочному коридору.** Исследования проводились на лесохозяйственной дороге, по которой осуществлялась трелевка пачек лесоматериалов в продольном направлении (рис. 3). Изучался цикл трелевки одного лесоматериала массой 260 кг, для большей чистоты получаемых экспериментальных данных. Расстояние трелевки составило 93 м.

Процесс перемещения бревна был разделен на 5 участков (рис. 4):

А) подъем бревна до упора с кареткой и перемещение вдоль трелевочного коридора;

Б) установившийся режим перемещения пачки;

В) приподнимание пачки перед прохождением опорного башмака; момент прохождения опорного башмака и спадание пачки с него;

Г) подъем на холм высотой 30 см и перемещение по нему;

Д) перемещение по новому следу (где еще не прорезана лесоматериалами колея);

Е) разгрузка пачки.

На участке А происходит рост усилия в тяговом канате до момента сдвига лежащей пачки (до преодоления силы трения покоя).

После этого на участке Б (рис. 4) наступает установившийся режим движения, вид графика значений усилия в канате свидетельствует об автоколебательном характере движения лесоматериала. Данный участок наблюдается большую часть пути трелевки бревна и несколько раз за весь цикл, пачка движется по наезженной колее, живой напочвенный покров снят.



Рис. 3. Процесс перемещения бревна массой 260 кг по трелевочному коридору длиной 93 м:  
 а – заправка канатов в каретке;  
 б – беспрепятственное движение вдоль трелевочного коридора

При прохождении кареткой промежуточной опоры (участок В) возникает резкий скачок усилия в тяговом канате. Данный скачок по времени был равен шагу измерения комплекса Spider 8 – 0,1 с (рис. 5, а). Рост усилия составил 50% по отношению к среднему на данном участке. Возможно, данный скачок по времени мог быть еще меньше. Такое резкое изменение могло быть вызвано необходимостью затянуть каретку на желоб опорного башмака (рисунок 5, б) либо, наоборот, вытянуть с желоба. После прохождения опорного башмака бревно снова начинает двигаться в установившемся режиме Б. После этого лесоматериал встречает единичное препятствие в виде земляного возвышения высотой 30 см (участок Г). Особенность участка Д в том, что при перемещении по трелевочному коридору в полуподвесном положении бревно (пачка) не всегда проходит по одному следу. Процесс перемещения по новому пути сопровождается большими сопротивлениями перемещению и большой частотой колебаний.

Процесс опускания пачки сопровождается резким падением усилия в тяговом канате (участок Е).

**Дискуссия по исследованию № 1.** Характер изменения усилия в тяговом канате подтверждает наличие автоколебаний при перемещении лесоматериалов, аналогично результатам исследований [1, 3, 5–7, 9–11]. По данным выполненных исследований было определено, что наибольшие скачки в значении тягового усилия наблюдаются при срыве пачки с места (преодоление силы трения покоя), когда амплитуда колебания максимального значения соседних пиков принимает очень близкие значения, что связано с одинаковой микроструктурой профиля трассы по всей ее длине (микровозвышенности и микропонижения, одинаковый напочвенный покров и близкая степень его разрушения).

Средняя величина усилия при установившемся режиме работы на вершине пика составляет 80–85% от массы пачки, а среднее значение усилия на данном участке 75–80%.

При выполнении испытаний на установке МТК-431 было зафиксировано два диапазона: движение пачки по «старому» (нарезанная колея) следу (0–50 с, рис. 4) и движение пачки по новому следу (50–60 с, рис. 4). Частота колебания усилия в первом случае составляла 1,9–2,2 с, во втором 1–1,2 с. Амплитуда колебаний значения усилия в тяговом канате при движении по старому и новому следу составила 0,5 и 0,8 кН соответственно.

Выполнение операции трелевки бревна по трелевочному коридору в полуподвешенном положении (бревно прижато к каретке) позволило выявить характерные особенности изменения

усилия в тяговом канате в чистом виде. Вертикальная составляющая усилия присутствует всегда при выполнении канатной транспортировки древесины, однако при работе многопролетных установок существует конкретный цикл ее изменения – при приближении к опорному башмаку она увеличивается, после его преодоления – уменьшается.

Экспериментальные исследования позволили наглядно оценить влияние особенностей трелевочного коридора по зонам:

- трелевочный коридор постоянной высоты, с одинаковым напочвенным покровом и степенью его повреждения;
- опорный башмак;
- земляной холм высотой 30 см;
- проход по новому следу. Полученная частота колебаний усилия в тяговом канате в 2,8–3,3 раза больше, чем в аналогичных исследованиях Журавлева Н. А. [12]. Что в первую очередь связано с различием в скорости трелевки: 0,4 и 2 м/с соответственно.

В отличие от исследований [5–7] не было установлено явного скачка в величине усилия при стопорении. Это может быть связано с достаточно небольшой скоростью подъема, которая, однако, также частично попадает в исследуемый в работе [5] диапазон скоростей. Рост усилия характеризует нарастание тяги для срыва пачки с места с преодолением силы трения покоя (рис. 4, а, зона А, пиковое значение), и дальнейшие колебания усилия в канате находятся в очень близком диапазоне.

**Преодоление опорного башмака.** Как показало исследование, усилие в тяговом канате при перемещении бревна в полуподвешенном положении (бревно прижато к каретке) практически совпадает с массой тела (260 кг – 2551 Н), пиковые значения при автоколебаниях соответствуют этому значению, однако при прохождении опорного башмака динамический коэффициент составил 1,5. В течение 0,1 с усилие снизилось с 2 до 1,08 кН, снова увеличилось до 3,1 кН и снизилось до установившегося значения в 2 кН.

В работе [7] не было зафиксировано скачка усилия в тяговом канате при прохождении опорного башмака. В то же время скачок тягового усилия был отмечен при сцеплении грузового крюка с кареткой. Эта разница может быть обоснована значительным различием в скорости подъема пачки: 2,4 м/с в работе [7] и 0,4 м/с в данном исследовании, а также различием в конструкции установок.

**Преодоление холма высотой 30 см.** Преодоление незначительной возвышенности сопровождалось увеличением усилия в тяговом канате на 25% по пиковым значениям, что представляет значительную величину.

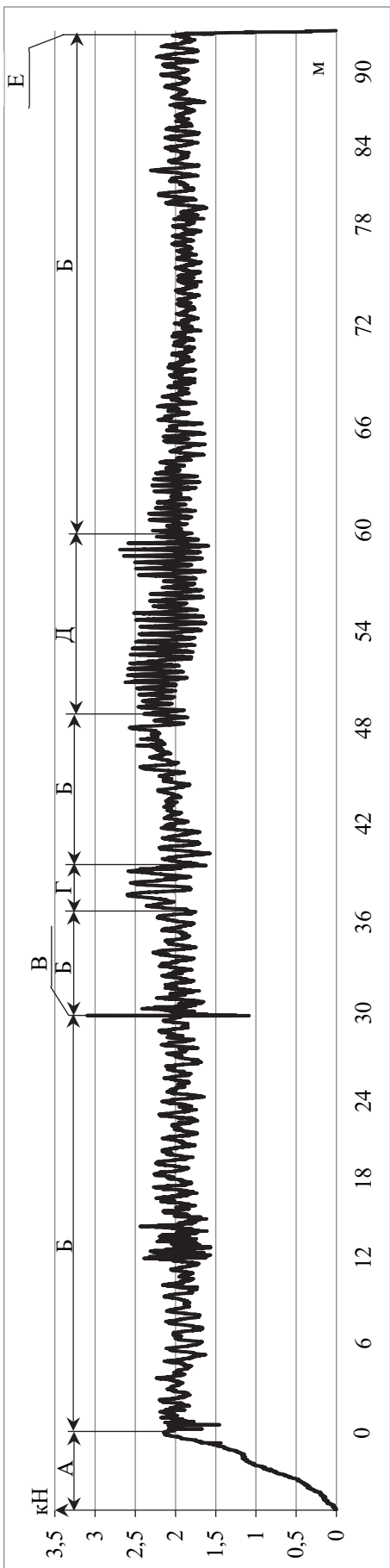


Рис. 4. Перемещение лесоматериала массой 260 кг на расстоянии 93 м

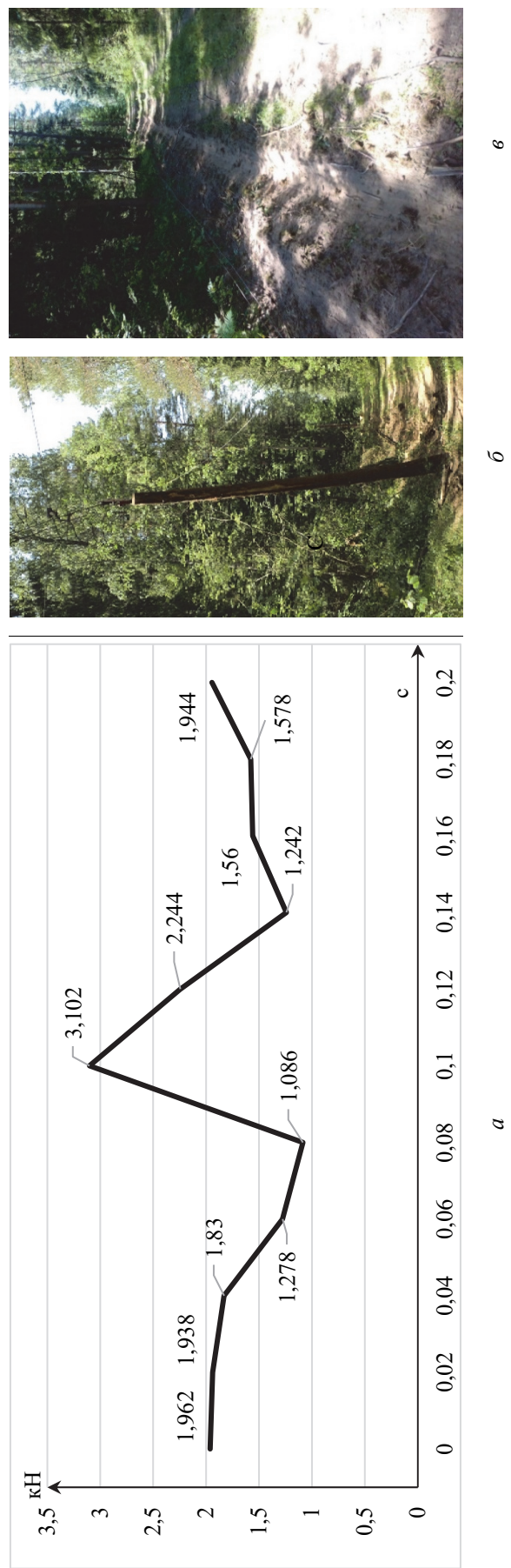


Рис. 5. Прохождение опорного башмака и ситуация на трелевочном коридоре:  
а – мгновенное изменение усилия в тяговом канате при прохождении опорного башмака; б – прохождение бревен опорного башмака; в – колес, прорезанные трельюемыми лесоматериалами





Рис. 6. Исследование усилия в тяговом канате при трелевке двумя способами:  
 а – волоком; б – в полуподвесном положении

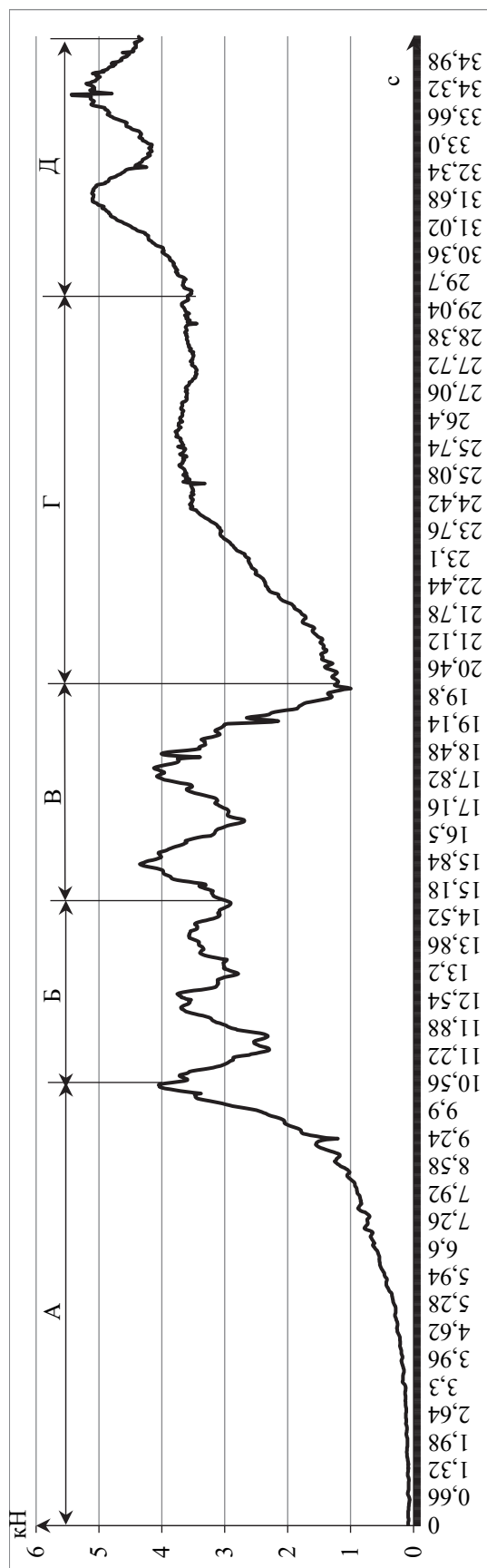


Рис. 7. Трелевка бревна массой 51,5 кг волоком (участки А, Б, В) или в полуподвесном положении (участки Г, Д) на участке длиной 12 м

*Проход по новому следу.* Как установил Коротьев Л. В. [11], при прохождении пачкой по одному следу сопротивление постепенно уменьшается до определенного значения, а потом незначительно увеличивается по сравнению с минимальным значением. В описанных в данной статье исследованиях не было возможности оценить эту особенность ввиду сложности организации значительной выборки испытаний. При этом выполненные исследования наглядно отражают резкое изменение характера усилия в канате при прохождении пачки по новому следу. Частота колебаний усилия в тяговом канате по сравнению с установившимся движением на участках Б (движение по уже наезженному следу) увеличилась и период колебаний уменьшился с 2 до 1 с. Это привело к увеличению количества циклов нагрузки-разгрузки каната.

**2. Сравнение эффективности выполнения трелевки волоком и в полуподвешенном положении.** Исследование усилия в тяговом канате при перемещении лесоматериала вдоль несущего каната заключалось в сравнении усилий при трелевке двумя разными способами: волоком и в полуподвешенном положении (рис. 6). Зависимость усилия тяги при перемещении бревна через эти препятствия представлена на рис. 7. Для данного исследования также выделяется несколько характерных участков: А – натяжение тягового каната до момента срыва пачки с места; Б – срыв пачки с места и движение ее волоком без контакта с лежащим бревном; В – движение пачки волоком с трением о лежащее бревно; Г – в начале участка остановка движения, далее подъем бревна до контакта с пачкой без продольного перемещения; Д – продольное перемещение пачки в полуподвешенном положении.

На участке А лесоматериал не перемещается, усилие в канате нарастает по параболе. Данный участок оканчивается максимальным усилием, необходимым для срыва лесоматериала с места. На участке Б бревно перемещается волоком в установившемся режиме, значение усилия в канате изменяется в соответствии с уже определенным автоколебательным характером движения, без касания лежащего бревна (первые 3 пика графика). При появлении трения движущегося волоком бревна о неподвижное начинается участок В, который характеризуется усилиями на 20% большими (пиковые усилия), чем при движении волоком без трения. Далее происходит разгрузка и расслабление каната, после чего бревно подымается снова до контакта с кареткой (участок Г) без продольного перемещения вдоль несущего каната. После этого каретка вместе с бревном перемещалась в продольном направлении в полуподвешенном положении (участок Д). При этом усилие тяги при перемещении бревна в полуподвешенном положении больше усилия волоком на 42%.

Важно отметить, что в данном исследовании термин «трелевка волоком» подразумевал практически беспрепятственное перемещение пачки, что можно видеть из рис. 6, а, б. Единственным видимым сопротивлением перемещению является частичное резание почвы комлевым срезом бревна.

*Дискуссия по исследованию № 2.* В соответствии с полученными результатами усилие в тяговом канате возможно снизить при выполнении частично полуподвешной трелевки, т. е. в положении на минимальной высоте от почвы (0,5–1 м), обеспечивающем беспрепятственное прохождение пачки по волоку без зацепов за пни, лежащие части лесоматериалов, ветви, сучья, земляные холмы и т. д. В ряде случаев по усмотрению оператора лебедки возможна трелевка в положении волоком, т. е. в положении, когда пачка перемещается без подъема над поверхностью трелевочного коридора, полностью контактируя по всей длине с почвой. Данный вариант будет особенно эффективен и практичен при сильном затоплении трелевочного коридора (рис. 3.12), так как в данном случае положительный эффект на уменьшение усилия в тяговом канате будет оказывать минимальный коэффициент трения скольжения между древесиной и водой (0,1).

В данном исследовании не было отмечено скачка усилия при стопорении пачки с кареткой (рис. 7, зона Д), как в работах [5–7]: пиковое значение практически идентично последующему значению на соседнем пике. Можно с уверенностью констатировать, что данные скачки усилия характеризуют преодоление силы трения покоя с почвой, а не удар пачки о каретку.

**3. Исследование изменения усилия в тяговом канате при подтрелевке.** Для изучения характера изменения усилия в описанных выше условиях было выполнено исследование усилия в тяговом канате при прохождении лесоматериалом лобовых препятствий.

Целью данного исследования являлась имитация наиболее опасных ситуаций во время трелевки. Было установлено, что зависимость между тяговым усилием и объемом хлыста незначительная, к тому же было выполнено 7 опытов, результаты которых сведены в график зависимости усилия тяги от объема хлыста (рис. 8).

В ходе проведения экспериментальных наблюдений было выявлено, что существует несколько вариантов встречи лесоматериала с пнем (рис. 9):

- 1) прямой упор с преодолением его вертикально по образующей пня (рис. 9, а, б, в);
- 2) прохождение лесоматериала касательно к образующей пня (рис. 9, г, д, е);
- 3) совмещение 1-го и 2-го вариантов, когда на первоначальном этапе лесоматериал начинает перемещаться по 1-му варианту, но в определенный момент соскакивает и уходит в сторону (рис. 9, ж, з, и).



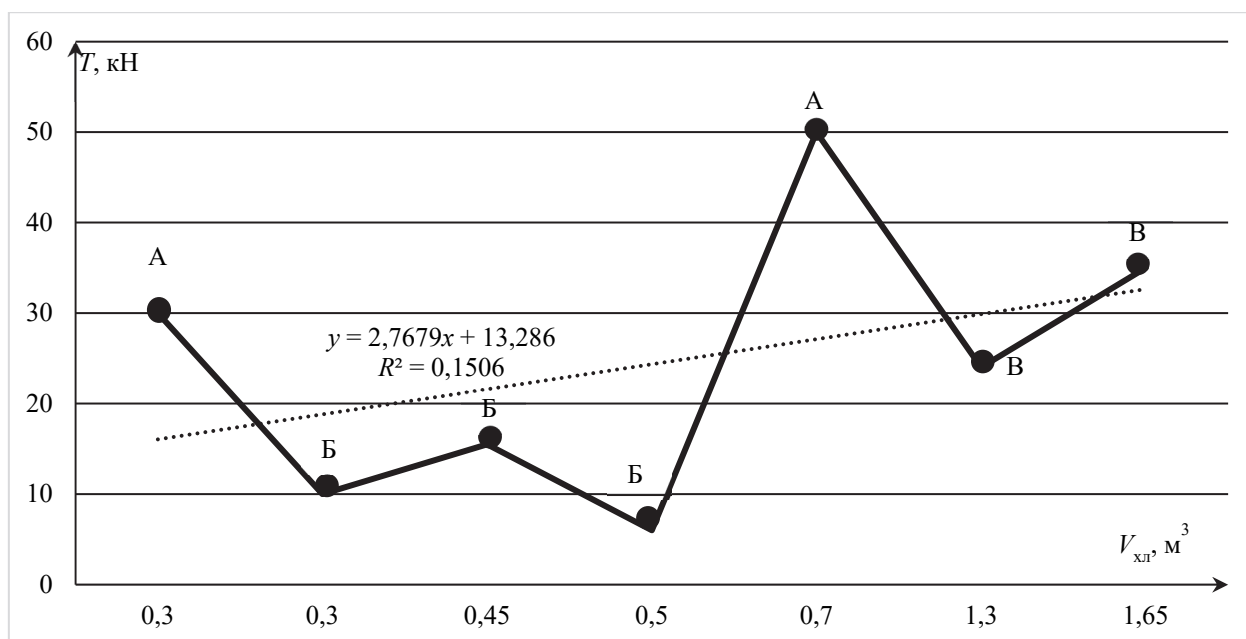


Рис. 8. График зависимости тягового усилия от объема хлыста:  
А – прямой упор; Б – прохождение по образующей; В – совмещение вариантов А и Б

*Дискуссия по исследованию № 3.* Анализ полученных результатов показал, что именно при преодолении пня по 1-му варианту возникают наибольшие динамические усилия в тяговом органе. Поэтому при выполнении операции подтре-

левки пачки и отдельных хлыстов к несущему канату нужно стремиться к исключению ситуаций встречи с пнем «в лоб», а также минимизировать количество и степень негативного влияния других способов встречи хлыста с пнем.



Рис. 9. Варианты встречи лесоматериала с пнем и стадии их преодоления:  
а, б, в – прямой упор с преодолением его вертикально по образующей пня;  
г, д, е – прохождение лесоматериала касательно к образующей пня;  
ж, з, и – комбинированный вариант

Значительно влияние подтрелевки на усилие как в тяговом, так и в несущем канате [1], что необходимо учитывать при проектировании и организации работы канатных установок. Так, подтрелевка пачки массой 1,45 т вызвала усилия в несущем канате, равные 180,3 кН, при монтажном натяжении каната в 100 кН (длина трассы 220 м, расстояние по вертикали между опорами 35 м).

По результатам источника [9], усилие в тяговом канате при подтрелевке с помощью воздушно-трелевочной установки ВТУ-3 не является таким значительным, как в полученных результатах при преодолении пней. Наибольшее значение усилия в тяговом канате, по данным того же источника [9], возникало при стопорении пачки с кареткой, зафиксированное значение которого было в 2 раза больше усилия на подтрелевку и подъем пачки к каретке. Величина усилия на подтрелевку пачки (2,47 т) была меньше массы пачки (3 т). В данном случае отличия в результатах могут быть объяснены различными условиями эксплуатации в горах и в равнинной заболоченной местности.

Полученные значения коэффициента сопротивления частично совпадают с результатами, полученными другими авторами: Алышев – 1,6 [10], Коротяев – 1,7 [11]. Однако верхний порог значений для исследуемой выборки оказался намного выше. Коэффициент сопротивления для хлыста объемом  $0,3 \text{ м}^3$  (усилие 30 кН) составил при пересчете на массу 12,7. Для объема хлыста  $0,7 \text{ м}^3$  коэффициент составил 9,1.

Очевидно, для получения полной картины зависимости усилия на преодоление пней необходим больший объем выборки, однако стоит отметить, что в процессе эксперимента по трелевке хлыста объемом  $0,7 \text{ м}^3$  через пень, в результате усилия, возможно, превышающего порог измерения датчиком (50 кН), был срезан соединительный болт, обеспечивающий соединение проушины датчика и цепи чокара. После этого случая испытания были прекращены из соображения безопасности. Данный факт в полном мере отражает аварийность и травмоопасность операции подтрелевки, особенно на заболоченных лесосеках.

**Выводы.** Выполненные экспериментальные исследования проводились не на заболоченной лесосеке, а на лесосеке с хорошей несущей способностью. Однако предварительные пробные исследования на заболоченных лесосеках [14] и аналогичный технологический цикл позволяют сделать вывод, что все результаты исследований в данной статье можно достаточно точно использовать для процесса заготовки древесины в условиях сильно увлажненных лесосек.

Трелевка древесины на заболоченной лесосеке сопряжена с образованием колеи, которая нарезается комлями хлыстов. При этом в зависимости от условий сезона заготовки поверхность трелевочного коридора может представлять собой:

а) смесь мокрого песка и воды с примесями частей лесоматериалов и напочвенного покрова летом (рис. 10, а);

б) смесь мокрого песка, воды, частично льда (разломанного и сдвигаемого проходами пачки) с примесями частей лесоматериалов и напочвенного покрова зимой (рис. 10, б);

Известно, что коэффициент трения скольжения древесины по воде и льду значительно меньше [15], чем при перемещении по твердой поверхности, поэтому с уверенностью можно сказать, что характер изменения усилия в тяговом канате при перемещении по трелевочному коридору будет аналогичен рис. 4 с той лишь разницей, что усилие тяги будет меньше.

Амплитуда и частота колебания максимального значения усилия тяги по сравнению с трелевкой по песчаному трелевочному коридору может снижаться за счет того, что нет такой явной силы трения покоя, которая способствует и образованию автоколебаний.

При выполнении подтрелевки для уменьшения сопротивления и снижения аварийности работы необходимо обеспечивать перемещение вершинной части пачки выше уровня лобовых сопротивлений.

Однако важно отметить, что в полной мере исключить зацепы пачки от лобовых сопротивлений, в первую очередь пней, невозможно.



а



б

Рис. 10. Заготовка древесины канатной установкой в различных условиях:  
а – летом; б – зимой

Для уменьшения негативного влияния лобовых препятствий на полупасеке следует:

- уменьшать расстояние подтрелевки и расстояние пролета между опорами;
- разрабатывать новые приемы работы и совершенствовать технологии работы установок с неподвижным несущим канатом;
- разрабатывать новые конструкции канатной установки для работы на заболоченных лесосеках с исключением операции подтрелевки.

Для уменьшения усилия при трелевке пачки вдоль трелевочного коридора необходимо обес-

печивать минимальную высоту подъема вершинной части пачки (не более 20 см), что позволит увеличить скорость трелевки и, следовательно, производительность работы.

Обеспечение перемещения пачки по одному следу при движении по трелевочному коридору позволит повысить долговечность тягового каната за счет уменьшения количества циклов нагружения, возникающих в результате автоколебаний. Также уменьшению усилия при трелевке на заболоченных лесосеках способствует наличие водного покрова, который значительно снижает коэффициент трения скольжения.

### Список литературы

1. Skyline tension, shock loading, payload and performance for a European cable yarder using two different carriage types / R. Spinelli [et al.] // *European Journal of Forest Research*. 2017. No. 136. P. 161–170.
2. Skyline tension and dynamic loading for cable yarding comparing conventional single-hitch versus horizontal double-hitch suspension carriages / R. Spinelli [et al.] // *International Journal of Forest Engineering*. 2021. No. 32. P. 31–41.
3. Harrill H., Visser R. Skyline tensile force monitoring of mobile tower yarders operating in the Italian Alps // *Future Forests Research Ltd*. 2013. No. 138. P. 847–862.
4. Ходосовский М. В. Исследование проходимости хлыстов при полуподвесной трелевке лебедками: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 1968. 276 л.
5. Матвеев Э. Н. Динамика подъема и стопорения груза на подвесных канатных лесотранспортных установках: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Львов, 1983. 252 л.
6. Адамовский Н. Г. Оптимальные режимы нагружения несущих канатов подвесных лесотранспортных установок с учетом приведенной жесткости системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Львов, 1984. 296 л.
7. Стан Й. Динамические нагрузки в тросах воздушно-трелевочных установок ВТУ-3 при подъеме груза к каретке // *Изв. высш. учебн. заведений. Лесн. журн.* 1965. № 2. С. 22.
8. Белая Н. М. Канатные лесотранспортные установки. М.: Лесная пром-сть, 1967. 299 с.
9. Белая Н. М. Теоретические и экспериментальные исследования стальных канатов подвесных лесотранспортных установок: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. М., 1967. 42 с.
10. Алышев И. Ф. Исследование сопротивления движению при трелевке лебедками ТЛ-3 полуподвесным способом: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 1953. 15 с.
11. Коротяев Л. В. Исследование сопротивления движению при трелевке леса: автореф. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Свердловск, 1970. 32 с.
12. Журавлев Н. А. Исследование динамики лебедочных механизмов при тяговых режимах нагружения: автореф. ... канд. техн. наук: 05.06.02. Львов, 1978. 22 с.
13. Удовичкий О. М. Обґрунтування основних параметрів та розробка привода мобільної канатної лісотransпортної установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.07. Львів, 1999. 236 л.
14. Исследование процесса трелевки хлыстов на заболоченных лесосеках канатными установками в зимний период / А. О. Шошин [и др.] // *Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 апр. 2017 г.* Минск, 2017. С. 72–76.
15. Коэффициент трения скольжения. URL: <http://всеформулы.рф/механика/коэффициент-трения-скольжения/> (дата обращения: 12.01.2022).

### References

1. Spinelli R., Marchi E., Visser R., Harrill H., Gallo R., Cambi M., Neri F., Lombardini C., Magagnotti N. Skyline tension, shock loading, payload and performance for a European cable yarder using two different carriage types. *European Journal of Forest Research*, 2017, no. 136, pp. 161–170.
2. Spinelli R., Magagnotti N., Cosola G., Grigolato S., Marchi L., Proto A. R., Labelle E. R., Visser R., Erber G. Skyline tension and dynamic loading for cable yarding comparing conventional single-hitch versus horizontal double-hitch suspension carriages. *International Journal of Forest Engineering*, 2021, no. 32, pp. 31–41.
3. Harrill H., Visser R. Skyline tensile force monitoring of mobile tower yarders operating in the Italian Alps. *Future Forests Research Ltd.*, 2013, no. 138, pp. 847–862.

4. Khodosovsky M. V. *Issledovaniye prokhozimosti khlystov pri polupodvesnoy trelevke lebedkami. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research stems patency at high lead yarding winches. Dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 1968. 276 p. (In Russian).
5. Matveev E. N. *Dinamika pod'yema i stoporeniya gruzha na podvesnykh kanatnykh lesotransportnykh ustanovkakh. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Dynamics lifting and locking the load on pendant rope highlead yarders. Dissertation PhD (Engineering)]. Lvov, 1983. 252 p. (In Russian).
6. Adamovskiy N. G. *Optimal'nyye rezhimy nagruzheniya nesushchikh kanatov podvesnykh lesotransportnykh ustanovok s uchetom privedennoy zhestkosti sistema. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Optimal loading regimes carrying ropes suspended lesotrans tailors installations taking into account the reduced stiffness of the system. Dissertation PhD (Engineering)]. Lvov, 1984. 296 p. (In Russian).
7. Stan I. Dynamic loads in the ropes of VTU-3 air-skidders when lifting the load to the carriage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest Journal], 1965, no. 2, p. 22 (In Russian).
8. Belaya N. M. *Kanatnyye lesotransportnye ustanovki* [Cable yarding systems]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 299 p. (In Russian).
9. Belaya N. M. *Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya stalnykh kanatov podvesnykh lesotransportnykh ustanovok. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical and experimental investigation of steel ropes suspended highlead yarders. Abstract of thesis PhD (Engineering)]; Moscow, 1967. 42 p. (In Russian).
10. Alyshev I. F. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lebedkami TL-3 polupodvesnym sposobom. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Resistance movement study yarding winch TL-3 semi-overhead way. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 1953. 15 p. (In Russian).
11. Korotyaev L. V. *Issledovaniye soprotivleniya dvizheniyu pri trelevke lesa. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the resistance movement at the timber yarding. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Sverdlovsk, 1970. 32 p. (In Russian).
12. Zhuravlev N. A. *Issledovaniye dinamiki lebedochnykh mekhanizmov pri tyagovykh rezhimakh nagruzheniya. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Investigation of the dynamics of winch mechanisms under traction loading conditions Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Lviv, 1978. 22 p. (In Russian).
13. Udovitskiy O. M. *Obgruntuvannya osnovnykh parametriv ta rozrobka pryvoda mobil'noi kanatnoi lisotransportnoi ustanovki. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Substantiation of the main parameters and development of the drive of the cable yarding system. Dissertation PhD (Engineering)]. Lviv, 1999. 236 p. (In Ukrainian).
14. Shoshyn A. O., Protas P. A., Mokhov S. P., Grechko V. V. Study of the cable crane tree-skidding process on swampy logging sites in the winter season. *Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy I-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging industry: problems and solutions: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, 2017, pp. 72–76 (In Russian).
15. Sliding friction coefficient. Available at: <http://всеформулы.рф/механика/коэффициент-трения-скольжения/> (accessed 12.01.2022).

#### Информация об авторе

**Шошин Артем Олегович** – ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

#### Information about the author

**Shoshyn Artsiom Olegovich** – assistant lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru, shoshyn@belstu.by

Поступила 14.10.2022