

алгоритмов и программ СССР.— М., 1982.— Вып. 1 (45).— 44 с. [6]. Николюк В. С. Исследование динамической нагруженности трансмиссии и ходовой части лесовозного автопоезда типа МАЗ в горных условиях: Автореф. дис... канд. техн. наук.— Краснодар, 1981.— 20 с. [7]. Семенов В. М., Кондрашкин С. И., Контанисов С. П. О динамике автомобиля как колебательной системы со многими степенями свободы // Автомоб. пром-сть.— 1976.— № 4.— С. 21—23. [8]. Техан В. С. Динамическое взаимодействие лесовозного автопоезда КРАЗ-255П + ГКБ-9383 с гравийной дорогой и обоснование их некоторых параметров: Автореф. дис... канд. техн. наук.— М., 1984.— 21 с.

Поступила 15 мая 1987 г.

УДК 630*375.4

ПОВЫШЕНИЕ РЕЙСОВОЙ НАГРУЗКИ НА ТРЕЛЕВОЧНЫЕ МАШИНЫ

Л. В. КОРОТЯЕВ

Архангельский лесотехнический институт

Выработку трелевочных машин можно поднять, как известно, увеличивая число пачек деревьев или хлыстов, стрелеванных за смену (число рейсов, циклов в смену), и объем пачки (рейсовую нагрузку на трелевочную машину). Способы увеличения объема трелеваемой пачки до настоящего времени не были достаточно изучены и рассматриваются в данной статье на основе многолетних теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором.

Самый энергоемкий процесс трелевки — перемещение пачки от места валки деревьев до лесопогрузочного пункта. При тракторной трелевке 60...70 %, а при канатной почти вся энергия расходуется на преодоление сопротивления движению пачки. Из уравнения работы, совершаемой трелевочным средством по преодолению сопротивления движению при трелевке в полупогруженном и полуподвешенном положении по горизонтальному волоку, получим:

$$F_m = [k\mu_m + (1 - k)\mu]G,$$

где F_m — сила тяги трелевочной машины на крюке, Н;
 k — доля веса пачки, приходящаяся на машину;
 μ_m — коэффициент сопротивления движению машины;
 $1 - k$ — доля веса пачки, приходящаяся на волок;
 μ — коэффициент сопротивления движению (КСД) пачки;
 G — вес пачки (рейсовая нагрузка на трелевочную машину), Н, или, упрощенно, без учета $k\mu_m G$:

$$F = (1 - k)G\mu = W,$$

где F — составляющая тягового усилия машины, параллельная трелевочному пути, необходимая для волочения пачки и равная сопротивлению ее движения W , Н.

Из уравнения работы и баланса сил рейсовая нагрузка $G = F/(1 - k)\mu$, а при $G = V\rho g/\varphi$ объем трелеваемой пачки

$$V = F\varphi/(1 - k)g\mu,$$

где φ — доля стволовой древесины в пачке, $\varphi = (100 - p_k)/(100 + p_{кр}(1 - 0,01\beta))$;

p_k — объем коры, % от объема ствола с корой;

$p_{кр}$ — масса (объем) кроны дерева, % от массы (объема) неокоренного ствола;

β — отпад элементов кроны в процессе валки деревьев и формирования пачки, % от массы кроны дерева;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

ρ — плотность свежесрубленной стволовой древесины, кг/м³.

Таким образом, основными критериями, определяющими объем трелеваемой пачки, являются сила тяги трелевочной машины и КСД. Следовательно, рейсовую нагрузку на трелевочную машину и объем трелеваемой пачки можно повысить двумя путями: 1) увеличением мощности двигателя и тягового усилия трелевочной машины; 2) снижением КСД пачки. Первое направление реализуется при совершенствовании трелевочных машин. Второе направление заслуживает не менее серьезного внимания, так как снижение КСД позволит увеличить объем пачки и выработку трелевочных машин при той же силе тяги, без ее повышения.

Сопротивление волочению пачки деревьев (хлыстов) в общем случае складывается из силы трения скольжения W и лобового сопротивления движению $W_{л}$, а коэффициент сопротивления движению — из коэффициента трения $\mu_{т}$ и коэффициента лобового сопротивления движению $\mu_{л}$, или, при $\mu_{л} = W_{л}/P$ (P — нагрузка на волок от веса волочащейся части пачки, Н):

$$\mu = \mu_{т} + W_{л}/P.$$

Главными природными, технологическими и производственно-техническими факторами, влияющими на КСД пачки, являются: наличие и размеры препятствий на пути движения, сезоны года, вид перемещаемого груза (деревья или хлысты), способ трелевки, вес и размеры пачки, средний объем и число хлыстов (деревьев) в пачке, объем стрелованной по волоку древесины, длительность остановок пачки, направление сдвигающей силы, скорость трелевки и жесткость трелевочной системы. Из них на коэффициент трения влияют факторы, улучшающие или ухудшающие условия скольжения, а на коэффициент лобового сопротивления — факторы, обуславливающие существование лобового контакта и вызывающие изменение его площади и прочности. Взаимное внедрение, деформирование и разрушение при движении микронеровностей, имеющихся на поверхностях деревьев, хлыстов и трелевочного пути, вызывают силу трения. Зацепление вершин хлыстов и сучьев деревьев за препятствия (подрост, пни, кочки и др.) на волоке и заглубление их в грунт или снег обуславливают возникновение лобового сопротивления движению. Наибольшее лобовое сопротивление движению оказывают выступы волока при наземной трелевке (волоком). При трелевке хлыстов в полупогруженном и полуподвешенном положении приподнятые их вершины в препятствия на волоке не упираются, лобовое сопротивление отсутствует, КСД не зависит от макрошероховатости пути движения и параметров пачки и равен коэффициенту трения. При перемещении пачки деревьев теми же способами и при наземной трелевке чачек деревьев или хлыстов имеет место лобовое сопротивление, вследствие упирания сучьев и вершин в неровности волока и зарезания в грунт или снег. В этом случае КСД зависит от макрошероховатости волока и параметров пачки. Зависимость КСД от веса пачки (рейсовой нагрузки) при $P = (1 - k) G$

$$\mu = \mu_{т} + W_{л}/(1 - k) G,$$

а от ее объема при $G = V\rho g/\varphi$

$$\mu = \mu_{т} + W_{л}\varphi/(1 - k) Vg\rho.$$

Объем пачки может увеличиваться или уменьшаться в результате изменения в ней числа деревьев (хлыстов) n и среднего их объема

V_x . Для данного лесозаготовительного предприятия или целой лесорастительной зоны средний объем хлыста — величина более или менее постоянная $V_{x_{пост}}$. Поэтому зависимость КСД от объема и других параметров пачки при $V_{x_{пост}}$ представляет наибольший практический интерес для лесозаготовительного производства. Уравнение связи и опыты показывают, что при наземной трелевке хлыстов и любом способе трелевки деревьев* и одинаковом объеме ствола с увеличением веса и объема пачки КСД гиперболически снижается (за счет уменьшения μ_d), стремясь в пределе к коэффициенту трения скольжения. При достаточно большом весе и объеме пачки второй член в формулах связей будет мал ($\mu_d \cong 0$) и величина КСД при неизменных условиях скольжения становится более или менее постоянной, равной коэффициенту трения. Момент, при котором КСД принимает минимальное и стабильное значение μ_t и при дальнейшем увеличении веса и объема пачки практически более не снижается, определяет размер критической рейсовой нагрузки. По нашим опытным данным, она равна 6...7 м³. Эта нагрузка является тем минимумом, при котором КСД и удельные затраты энергии на перемещение пачки становятся наименьшими и при увеличении ее объема сверх критического остаются неизменными. Динамометрирование трактора показало, что для перемещения в зимнее время пачки деревьев объемом 2 м³ требуется усилие 22 кН, объемом 6 м³ — 33 кН, т. е. в 1,5 раза больше, тогда как объем пачки возрос в 3 раза; удельные энергозатраты в этом случае снизились в 2 раза. Следовательно, для снижения КСД и удельных затрат энергии и повышения производительности трелевочных средств рейсовые нагрузки надо увеличивать до критического размера и выше.

С увеличением числа деревьев в пачке при постоянном их среднем объеме КСД также гиперболически снижается. Это явление объясняется тем, что из большого числа деревьев (хлыстов) образуется многорядная пачка и лишь нижние контактируют с поверхностью волока.

Объем пачки, сформированной из одинакового числа мелких или крупных деревьев (хлыстов), не оказывает влияния на КСД ($\mu = 0,66$ летом и $\mu = 0,64$ зимой). Очевидно, что целесообразно формировать пачки из одинакового числа деревьев (хлыстов) одной крупности.

По лесорастительным зонам и лесосырьевым базам лесозаготовительных предприятий средний объем хлыста меняется. В этом случае практическое значение имеет зависимость КСД от параметров пачки при одинаковом ее объеме и переменном среднем объеме хлыста. При одинаковом объеме пачки с увеличением объема хлыста КСД понижается по гиперболе, вследствие уменьшения числа деревьев (хлыстов) в пачке, числа лобовых контактов и μ_d . Следовательно, в зонах с мелкими лесонасаждениями КСД больше, чем в зонах с крупномерными насаждениями. С увеличением числа хлыстов (деревьев) в пачке и одновременным уменьшением их среднего объема КСД возрастает линейно в результате увеличения числа зацеплений и лобового сопротивления, причем интенсивнее в зимнее время. В данном случае для снижения КСД, в первую очередь в зонах с мелкими древостоями, необходимо готовить волока на ширину пачки, срезая деревья и подрост заподлицо с поверхностью земли, а если это экономически невыгодно, то повсеместно, даже при сборе деревьев (хлыстов) в пачку, применять трелевку в полупогруженном положении за вершину или переходить на транспортировку их в полностью погруженном положении. При этом КСД не зависит от ориентации деревьев или хлыстов (комлями или

* Перемещение деревьев и хлыстов в полностью погруженном или подвешенном положении трелевкой не является.

вершинами вперед), но при трелевке вершиной вперед рейсовая нагрузка на машину больше, при условии одинакового использования ее грузоподъемности. Характер зависимости КСД от объема и числа деревьев (хлыстов) в пачке говорит, в частности, о целесообразности трелевки мелких деревьев (хлыстов) вместе с крупными, что обеспечит некоторое снижение КСД и повышение рейсовой нагрузки.

Увеличение объема древесины Q , стрелеванной по волоку, приводит к качественному изменению его поверхности в процессе трелевки и изменению КСД. Максимальное сопротивление W_{max} и μ_{max} наблюдается при волочении пачки прямо по вырубке или первой пачке по трелевочному волоку, когда выступы волока еще не деформированы и не разрушены, а его поверхность не сглажена. По мере увеличения числа пачек и объема стрелеванной по участкам волока древесины до оптимального Q_{opt} его поверхность прирабатывается, условия скольжения улучшаются и КСД снижается до μ_{min} по закону

$$\mu = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) k_n,$$

где k_n — коэффициент, учитывающий влияние Q на КСД, $k_n \cong Q/Q_{opt}$.

В летнее время процесс приработки сопровождается износом мохового покрова и снижение КСД происходит до появления на волоке пятен обнаженного подстилающего грунта. В момент их появления величины μ_r , W_d и μ принимают минимальное значение μ_{rmin} , W_{dmin} , μ_{min} , а объем Q — оптимальное, равное 80...85 м³.

Расчетные значения μ зависят от способа разработки пачки и организации работ. При освоении пачки с ближнего от лесопогрузочного пункта конца с продвижением в глубь ее каждая пачка вначале перемещается по неприработанному участку волока. В этом случае $Q = 0$, $k_n = 0$ и $\mu = \mu_{max}$. При разработке пачки с дальнего конца пачки перемещаются по более или менее наезженному волоку и КСД их с увеличением Q снижается от μ_{max} при $Q = 0$ до μ_{min} при $Q = Q_{opt}$, составляя в среднем $(\mu_{max} + \mu_{min})/2$.

По нашим опытным данным, при трелевке в полупогруженном положении деревьев за комли $\mu_{max} = 0,89$, $\mu_{min} = 0,38$; хлыстов за вершины $\mu_{max} = \mu_{rmax} = 0,44$ и $\mu_{min} = \mu_{rmin} = 0,25$ зимой и $\mu_{max} = \mu_{rmax} = 0,53$ и $\mu_{min} = \mu_{rmin} = 0,32$ летом.

С увеличением числа и размеров пятен и дальнейшего обнажения грунта при $Q > Q_{opt}$ коэффициент трения, а следовательно, и μ , возрастает до определенного предела, вследствие большего значения μ_r при волочении пачки по грунту в сравнении с движением по моховому покрову, и стабилизируется при полном его износе, принимая постоянное значение μ_r , равное 0,49. В зимнее время с увеличением Q условия скольжения по волоку с его приработкой непрерывно улучшаются и КСД монотонно снижается. При $Q = Q_{opt} = 130...150$ м³ КСД достигает минимума μ_{rmin} и при дальнейшем увеличении Q сверх Q_{opt} практически не снижается. Для повышения рейсовой нагрузки с учетом связи $\mu(Q)$ рекомендуется: 1) трелевку вести с дальнего от лесопогрузочного пункта конца пачки, так как в этом случае все пачки, кроме первой, пройдут по накатанному волоку при меньшем значении КСД, чем при трелевке с ближнего конца; 2) в летнее время осваивать пачки с запасом древостоя, не превышающим Q_{opt} так как с увеличением Q только в пределах от нуля до Q_{opt} КСД снижается; длина пачки l_n при известных ее ширине b_n (например 30 м) и запасе на 1 га $Q_{га}$, в этом случае определится из соотношения: $l_n = 10\,000 Q_{opt} / b_n Q_{га}$. В зимнее время l_n и Q не ограничиваются.

С продолжительностью времени покоя пачки КСД увеличивается по экспоненциальному закону, возрастая от 1,09 до 1,65 зимой и до

1,47 летом при трелевке пачек деревьев комлями вперед и от 0,85 до 1,49 зимой и от 0,8 до 1,2 летом при трелевке пачек хлыстов за вершины. Наиболее интенсивно КСД растет при увеличении времени покая до 20 мин. Для снижения КСД и повышения рейсовых нагрузок необходимо сводить до минимума разрыв времени между валкой и трелевкой и продолжительность остановок пачки в пути. Это достигается при трелевке ВТМ. Продольный сдвиг с места одиночных деревьев, хлыстов и пачек требует наибольшего усилия, так как контактные связи между деревьями (хлыстами) и поверхностью земли (снега) разрушаются одновременно. Значения КСД ниже в случае приложения тангенциальной сдвигающей силы под углом к продольной оси дерева, хлыста, пачки. С увеличением угла от нуля до 90° КСД снижается от 1,56 до 0,67 по квадратной косинусоиде, так как контактные связи разрушаются поочередно, вследствие поперечного изгиба деревьев (хлыстов) в процессе сдвига. При валке деревьев комлями на подкладку, при их сдвиге под разными углами КСД не меняется и равен 0,86. Для уменьшения КСД и увеличения рейсовых нагрузок пачки и одиночные деревья (хлысты) при трелевке за вершины нужно приподнимать вверх или сдвигать в сторону под возможно большим углом к продольной оси, если этому не мешают пни, нет подроста или не требуется его сохранение, а при трелевке тракторами с чокерной оснасткой деревьев за комли валить их на подкладочный хлыст.

С увеличением скорости КСД снижается экспоненциально, приближаясь к минимальному значению для конкретных условий трелевки μ_{min} . Стабильное минимальное значение КСД принимает при критической скорости $v_{кр}$, превышение которой не вызывает дальнейшего существенного его снижения. Значения $v_{кр}$: при трелевке хлыстов ≈ 1 м/с, при трелевке деревьев 1...1,7 м/с зимой и ≈ 2 м/с летом. Кривая этой связи очень пологая, поэтому аппроксимирована нами линейным уравнением в пределах до $v_{кр}$:

$$\mu = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) k_c v,$$

где k_c — коэффициент, учитывающий влияние скорости на КСД: при $v < v_{кр}$ $k_c = 1/v_{кр}$, при $v > v_{кр}$ $k_c = 1/v$.

Для снижения КСД с целью повышения рейсовых нагрузок необходимо увеличивать скорость трелевки до критического значения и выше. Повышение скорости приведет, кроме того, к увеличению числа рейсов.

Использование закономерностей изменения КСД под влиянием различных факторов и опытных данных позволит установить такие значения этих факторов, при которых $\mu \cong \mu_{min}$ и, реализовав их на практике, снизить КСД и тем самым повысить рейсовую нагрузку (объем пачки) и производительность трелевочных машин, а также уменьшить энергозатраты на трелевку.

УДК 539.3

**К РАСЧЕТУ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
КОНСТРУКЦИИ МАНИПУЛЯТОРА
ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ**

М. В. КОНДАКОВ

Московский лесотехнический институт

Одна из ключевых задач проектного расчета манипуляторов для лесной, деревообрабатывающей и мебельной промышленности — определение динамического нагружения конструкции, достигающее экстремальных значений, как правило, при переходных процессах. Достаточно полное описание динамического нагружения конструкции манипулятора можно провести на основе расчетной модели, состоящей из балочных элементов с переменными по длине массово-жесткостными характеристиками и дискретными включениями. Уравнение движения такой модели получено в работе [1] в достаточно общих предположениях и сведено к каноническому матричному виду

$$[M] \frac{\partial^2 \vec{y}}{\partial t^2} + L \vec{y} = \vec{F}, \tag{1}$$

где

$$L = [A] \frac{\partial^2}{\partial x^2} + [B] \frac{\partial}{\partial x} + [C].$$

В случае плоского движения вектор решения \vec{y} имеет вид

$$\vec{y} = (u, w, \psi, u^1, w^1, \psi^1, \dots, u^k, w^k, \psi^k)^T, \tag{2}$$

где u, w, ψ — продольное, поперечное и угловое перемещения поперечного сечения;

u^i, w^i, ψ^i — соответствующие перемещения i -го осциллятора;
 k — число осцилляторов в системе.

Уравнение (1) вместе с граничными и начальными условиями полностью определяют смешанную задачу, описывающую движение упругого манипулятора. Однако для непосредственного интегрирования уравнения (1) требуется решение краевой задачи на каждом шаге интегрирования по времени, что делает численную реализацию такого подхода весьма ресурсоемкой (по времени счета и объему памяти ЭВМ) и дорогостоящей.

Рассмотрим более рациональный подход к решению задачи, основанный на переходе от смешанной задачи для уравнения (1) в частных производных к задаче Коши для уравнений в обыкновенных производных.

Выбор метода решения уравнения (1) зависит от свойств оператора L , областью определения D_L которого является класс функций:

$$\vec{\xi}_i = (u_i, w_i, \psi_i, u_i^1, w_i^1, \psi_i^1, \dots, u_i^k, w_i^k, \psi_i^k)^T, \tag{3}$$

определенных на $x \in [0, l]$, $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ выражением (2) и удовлетворяющих граничным условиям.

Будем считать, что рассматриваемая механическая система манипулятор — груз имеет шарнирно закрепленный левый и свободный правый край