

УДК 630\*36.001.6

С. А. Голякевич, аспирант (БГТУ)

## АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Публикация посвящена анализу режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин на различных операциях технологического цикла. Предложена комплексная методика обоснования рациональных режимов выполнения технологических операций многооперационных лесозаготовительных машин и энергетических параметров привода технологического оборудования для их реализации, учитывающая различные способы выполнения технологических операций, взаимовлияние показателей энергонасыщенности и производительности машин. Даны рекомендации по рациональным режимам выполнения операций и энергетическим параметрам технологического оборудования.

The publication is devoted the analysis of operating modes multioperational forest machines in various operations of a work cycle. The complex technique of a substantiation of rational modes of performance technological operations multioperational forest machines and power parameters of a drive of process equipment for their realization, considering various ways of performance of technological operations, interference of indicators energy and productivity of machines is offered. Recommendations about rational modes of performance of operations and to power parameters of the process equipment are given.

**Введение.** Нагруженность конструкций многооперационных лесозаготовительных машин существенно зависит от конструктивных параметров технологического оборудования и базового шасси, энергетических параметров их привода, способов выполнения технологических операций и др. Их обоснованный выбор позволяет обеспечить эффективную работу машин при рациональном уровне нагруженности несущих конструкций. Это требует разработки комплексного критерия оценки параметров многооперационных лесозаготовительных машин и способов выполнения технологических операций.

**Основная часть.** В качестве критерия оценки эффективности машин часто используется величина технической производительности [1–5], которая функционально зависит от параметров лесозаготовительной машины, применяемой технологии работ, параметров предмета труда, условий движения и др. Влияние данных факторов на величину технической производительности и характер ее изменения в различных условиях эксплуатации не одинаково. Это, наряду с отсутствием учета энергозатрат, необходимых для выполнения операций, не позволяет [4, 6] использовать величину технической производительности для однозначной оценки параметров лесозаготовительных машин.

Оценке эффективности работы лесозаготовительных машин посвящены работы В. Г. Кочегарова. В качестве оценочного критерия энергетической эффективности лесозаготовительных машин им предлагается использовать показатель энергоемкости работы [7], заключающийся в определении требуемых энергозатрат при заготовке единицы объема древесины.

Энергоемкость и производительность операций технологических циклов лесозаготовительных машин часто рассматриваются совместно, с учетом [5] и без учета [4, 8] взаимосвязи между ними. Рассматривая удельные показатели энергоемкости и производительности, Д. А. Букалов [6] отмечает, что несмотря на наличие связи между ними для конкретной технологии заготовки сортиментов, имеет место неопределенность в выборе машин для ее реализации, так как приведенные показатели не дают возможности однозначного обоснования параметров машин.

Обобщая изложенное, отметим, что применительно к анализу параметров лесозаготовительных машин используется ряд разрозненных критериев: производительности, энергоемкости и трудоемкости лесозаготовительных работ в различном сочетании, а также технико-экономическая оценка производства с их использованием. Однако для однозначной оценки массово-геометрических и энергетических параметров лесозаготовительных машин в различных условиях эксплуатации необходим комплексный критерий, исключающий несоответствие между энергоотдачей машины и выполняемой ей полезной работой.

Такой критерий известен в области исследования параметров однооперационных транспортных дорожно-строительных машин и установления рационального уровня их энергонасыщенности. В совместной работе Ю. В. Гинзбурга и А. И. Шведа [9] показано, что предпочтительным критерием для оценки параметров транспортных машин является критерий энергетического потенциала производительности (ЭПП), равный полезной работе совершенной

машиной в единицу времени и учитывающий составляющие технологического цикла:

$$A = P_{\text{к}} v_{\text{дв}} \frac{t_{\text{рх}}}{t_{\text{цикл}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{к}}$  – развиваемая двигателем машины касательная сила тяги, Н;  $v_{\text{дв}}$  – скорость движения машины, м/с;  $t_{\text{рх}}$ ,  $t_{\text{цикл}}$  – время рабочего хода и суммарное время цикла соответственно, с.

Между тем в работе многооперационных лесозаготовительных машин существует ряд особенностей, не позволяющих напрямую использовать выражение (1) для определения их ЭПП. Это наличие в технологическом цикле не только транспортных, но и технологических операций, не связанных с перемещением машины, значительная продолжительность работы оборудования на переходных режимах, наличие нескольких способов выполнения одной технологической операции.

Так, продолжительность технологического цикла работы форвардера  $T_{\text{ц}}^{\Phi}$  зависит от: времени подъема пачки сортиментов манипулятором  $t_1^{\Phi}$ , поворота манипулятора до уровня погрузочной площадки  $t_2^{\Phi}$ , укладки пачки сортиментов на погрузочную площадку  $t_3^{\Phi}$ , обратных холостых ходов  $t_4^{\Phi} - t_6^{\Phi}$  и их количества, аналогичных операций на разгрузке сортиментов в штабель на погрузочном пункте  $t_7^{\Phi} - t_{12}^{\Phi}$ , перемещения форвардера при наборе пачек сортиментов  $t_{13}^{\Phi}$  и их разгрузке  $t_{14}^{\Phi}$ , движения в груженом состоянии на погрузочный пункт  $t_{15}^{\Phi}$  и холостого хода на лесосеку  $t_{16}^{\Phi}$ , а также суммарного времени межоперационных задержек  $t_{17}^{\Phi}$ :

$$T_{\text{ц}}^{\Phi} = \frac{V_{\Phi}}{V_{\Pi}} \sum_{i=1}^{12} t_i^{\Phi} + \sum_{i=13}^{17} t_i^{\Phi}, \quad (2)$$

где  $V_{\Phi}$  – объем перевозимых форвардером сортиментов, м<sup>3</sup>;  $V_{\Pi}$  – объем поднимаемой манипулятором пачки сортиментов м<sup>3</sup>.

При работе харвестеров полезная работа выполняется только при использовании технологического оборудования: при натяге дерева (за время  $t_1^x$ ), подтаскивании его к месту раскряжевки (за время  $t_2^x$ ), очистке от сучьев (за время  $t_3^x$ ), раскряжевке ствола (за время  $t_4^x$ ). На операциях движения и холостого перемещения манипулятора полезная работа не выполняется ввиду отсутствия взаимодействия харвестера с деревом. Исключение составляет лишь случай выноса дерева с пачки ходом харвестера.

Суммарное время цикла работы харвестера  $T_{\text{ц}}^x$  в общем случае может быть определено на основании исследований [10].

Исходя из изложенного выражение для определения ЭПП многооперационных лесозаготови-

тельных машин, реализующих сортиментную технологию заготовки древесины, имеет вид:

для харвестеров

$$\text{ЭПП}_x = \left( \frac{N_1^x t_1^x + N_2^x t_2^x}{+ N_3^x t_3^x + N_4^x t_4^x} \right) \frac{n_1}{T_{\text{ц}}^x}; \quad (3)$$

для форвардеров

$$\text{ЭПП}_{\Phi} = \left[ \left( \frac{N_1^{\Phi} t_1^{\Phi} + N_2^{\Phi} t_2^{\Phi}}{+ N_4^{\Phi} t_7^{\Phi} + N_5^{\Phi} t_8^{\Phi}} \right) \frac{V_{\Phi}}{V_{\Pi}} + N_3^{\Phi} t_{15}^{\Phi} \right] \frac{1}{T_{\text{ц}}^{\Phi}}, \quad (4)$$

где  $N_1^x$  – мощность, необходимая на натяг дерева, Вт;  $N_2^x$  – мощность привода пильного механизма при срезании дерева, Вт;  $N_3^x$  – мощность, затрачиваемая на обрезку сучьев с дерева, Вт;  $N_4^x$  – мощность, затрачиваемая на раскряжевку одного ствола, Вт;  $n_1$  – количество деревьев, обрабатываемых с одной технологической стоянки, зависящее от вида проводимой рубки и плотности древостоя;  $N_1^{\Phi}$ ,  $N_2^{\Phi}$ ,  $N_4^{\Phi}$ ,  $N_5^{\Phi}$  – мощность, затрачиваемая на подъем – опускание и перенос пачки сортиментов манипулятором на погрузочных и разгрузочных операциях соответственно, Вт;  $N_3^{\Phi}$  – мощность, затрачиваемая на движение груженого форвардера, Вт.

Требуемые для расчета энергетические затраты при выполнении соответствующих операций технологических циклов многооперационных машин могут быть определены с использованием пространственной математической модели [11].

В случае необходимости сравнения параметров машин различных конструкций либо оценки приемов выполнения технологических операций следует использовать критерии удельного ЭПП (УЭПП) и удельного частного ЭПП (УЧЭПП) соответственно. УЭПП – это отношение суммарной работы, выполненной на всех рабочих технологических операциях к величине ЭПП. Отличие УЭПП от УЧЭПП состоит в том, что последний рассматривает суммарную работу, выполненную только на одной конкретной операции:

для харвестеров

$$\text{УЭПП}_x = \frac{A_{\text{полн}}^x}{\left( \frac{N_{1\text{полн}}^x t_1^x + N_{2\text{полн}}^x t_2^x}{+ N_{3\text{полн}}^x t_3^x + N_{4\text{полн}}^x t_4^x} \right) \frac{n_1}{T_{\text{ц}}^x}}; \quad (5)$$

для форвардеров

$$\text{УЭПП}_{\Phi} = \frac{A_{\text{полн}}^{\Phi} \cdot T_{\text{ц}}^{\Phi}}{\left[ \left( \frac{N_{1\text{полн}}^{\Phi} t_1^{\Phi} + N_{2\text{полн}}^{\Phi} t_2^{\Phi}}{+ N_{4\text{полн}}^{\Phi} t_7^{\Phi} + N_{5\text{полн}}^{\Phi} t_8^{\Phi}} \right) \frac{V_{\Phi}}{V_{\Pi}} + N_{3\text{полн}}^{\Phi} t_{15}^{\Phi} \right]}, \quad (6)$$

где  $N_{i\text{пол}}^x, N_{i\text{пол}}^ф$  – величины полезно затрачиваемых мощностей при выполнении  $i$ -х операций технологических циклов харвестера и форвардера соответственно;  $A_{\text{полн}}^x, A_{\text{полн}}^ф$  – суммарные работы, выполненные на рабочих операциях технологических циклов харвестера и форвардера соответственно.

В суммарную величину мощности, затрачиваемой при работе многооперационной машины, входит как полезная мощность (на перемещение или изменение параметров самого предмета труда), так и мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, сопротивления перемещению технологического оборудования и машины без учета предмета труда, которая не является полезной при определении УЭПП и УЧЭПП.

Предлагаемые удельные критерии основаны на оценке эффективности расходования энергетического потенциала многооперационной машины в единицу времени. В случае УЧЭПП оценка представляет собой отношение суммарного времени цикла работы многооперационной машины к КПД, выполняемой ею операции. При этом рациональным режимом выполнения операции многооперационной машиной с заданными конструктивными и энергетическими параметрами следует считать тот, при котором величина критерия стремится к минимуму.

Проведенные исследования позволили оценить эффективность различных приемов выполнения технологической операции обрезки сучьев.

В практике эксплуатации харвестеров используется 3 различных способа ее выполнения:

- непосредственная подача дерева на сучкорезные ножи вальцами харвестерной головки, в том числе с началом подачи дерева во время падения;
- перемещение харвестерной головки вальцами вдоль ствола дерева при одновременной встречной ее подаче манипулятором (полностью контролируется оператором);
- подача харвестерной головки вальцами вдоль ствола дерева при установке гидравлического привода манипулятора в «следящее» положение.

На рис. 1 представлены зависимости изменения эффективности эксплуатации харвестера 4К4 при использовании различных приемов выполнения данной операции. Обрезка сучьев с деревьев в сосновых древостоях с  $d_{1,3}$  до 0,19 м (рис. 1, область I) характеризуется возможностью использования только прямого способа подачи дерева вальцами на сучкорезные ножи (способ № 1).

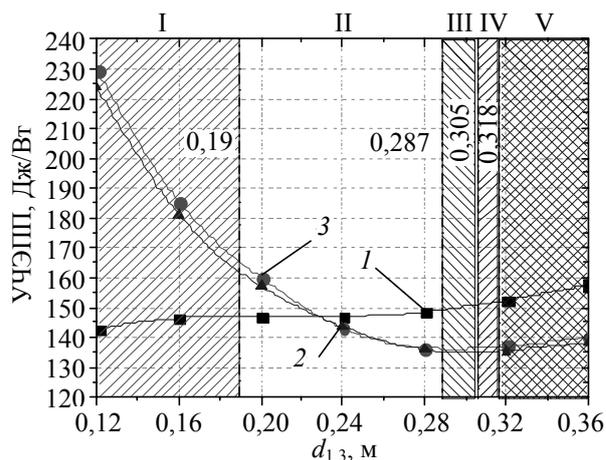


Рис. 1. Эффективность различных приемов выполнения технологической операции обрезки сучьев (номинальная мощность привода вальцов – 60кВт, вылет манипулятора – 6,3 м):  
1 – при непосредственной подаче дерева вальцами на сучкорезные ножи; 2 – с дополнительной подачей харвестерной головки манипулятором на дерево;  
3 – с переводом манипулятора в «следящее» положение

Невозможность использования совмещенных способов выполнения данной операции обусловлена следующими факторами. Величина усилия сопротивления подаче харвестерной головки на дерево в таких древостоях достигает 6,53 кН, а усилие сопротивления волочению кроны сосны ниже данного значения. В случае встречной подачи харвестерной головки на дерево непосредственно манипулятором (способ № 2) такое соотношение в усилиях в момент встречи сучкорезных ножей с сучьями приводит к перемещению дерева в направлении подачи на него харвестерной головки и невозможности осуществления операции.

При выполнении операции с переводом манипулятора в «следящее» положение (способ № 3) усилие, требуемое на поворот манипулятора (при вылете 6,3 м), также оказывается выше силы сопротивления волочению кроны. При этом манипулятор остается неподвижным, а обрезка сучьев выполняется по способу непосредственной подачи дерева вальцами на сучкорезные ножи.

В сосновых древостоях с  $d_{1,3}$  от 0,19 до 0,287 м (рис. 1, область II) возможно использовать все 3 рассматриваемых способа обрезки сучьев. Однако эффективность применения способов с совмещением (№ 2 и № 3) в древостоях с  $d_{1,3}$  до 0,225 м до 8–11% ниже, чем при выполнении операции без совмещения, даже несмотря на меньшее требуемое усилие протаскивания и большую скорость выполнения операции. Это обусловлено необходимостью повторного перемещения дерева к месту раскряжевки после

выполнения операции такими способами, что приводит к увеличению продолжительности обработки одного дерева на 4–7 с.

Проведение операции обрезки сучьев в сосновых древостоях с  $d_{1,3}$  более 0,287 м при использовании способа № 1 невозможно и обусловлено недостаточным тяговым усилием протаскивающих валцов (до 28 кН). При этом применение способа обрезки сучьев № 2 возможно до  $d_{1,3} = 0,318$  м, а способа № 3 – до  $d_{1,3} = 0,305$  м. При анализе способа № 2 рассматривался случай, при котором дополнительное усилие манипулятора, действующее на харвестерную головку, составляет 75% от силы сопротивления волочению кроны дерева. Поэтому в случае выполнения обрезки сучьев таким способом максимальный обрабатываемый диаметр дерева  $d_{1,3}$  может быть увеличен за счет большего усилия подачи манипулятором, но не более силы сопротивления волочению кроны дерева.

Повысить эффективность работы харвестера можно за счет увеличения мощности привода подающих валцов, а расширить диапазон обрабатываемых стволов за счет увеличения усилия подачи. При увеличении усилия протаскивания до 32 кН величина УЧЭПП работы харвестера изменится, как показано на рис. 2 (область II).

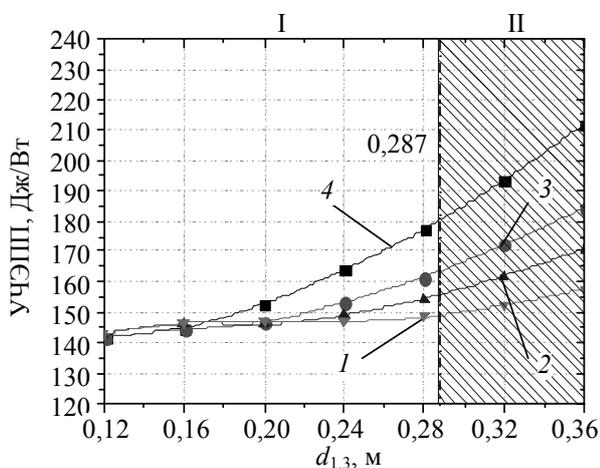


Рис. 2. Эффективность эксплуатации харвестера при различной мощности привода валцов харвестерной головки (номинальное тяговое усилие валцов ограничено 28 кН)  
1 – 60 кВт; 2 – 50 кВт; 3 – 40 кВт; 4 – 20 кВт

Увеличение мощности привода протаскивающих валцов при обработке деревьев с  $d_{1,3} < 0,17$  м лишь незначительно влияет на эффективность работы харвестера. Более того, при повышении мощности привода свыше 27 кВт для деревьев с  $d_{1,3} < 0,17$  м и свыше 38 кВт для деревьев с  $d_{1,3} < 0,20$  м происходит снижение эффективности работы на 1–3%. Это обусловлено

малым временем разгона дерева до максимальной скорости и увеличением действующих сил инерции дерева. При этом полезно выполняемая харвестерной головкой работа остается неизменной, время выполнения операции изменяется незначительно, а общая выполняемая приводом работа возрастает, что нерационально.

При мощности привода свыше 60 кВт эксплуатация харвестера в сосновых древостоях с  $d_{1,3}$  до 0,28 м и использовании первого способа выполнения операции обрезки сучьев нецелесообразна. Ее изменение с 60 кВт до 70 кВт вызовет снижение УЧЭПП лишь в 1,020–1,025 раза.

При использовании способа обрезки сучьев № 2 в диапазоне его возможного применения (рис. 2, область II) с увеличением мощности привода протаскивающих валцов с 20 кВт до 60 кВт эффективность работы харвестера в древостое с  $d_{1,3} = 0,20$  м уменьшается, а при обработке деревьев с  $d_{1,3} > 0,26$  м, напротив, увеличивается.

Изменение функции УЧЭПП носит нелинейный характер. При этом в диапазоне условий с  $d_{1,3}$  от 0,20 м до 0,26 м с увеличением мощности привода область меньших значений УЧЭПП смещается в сторону больших диаметров  $d_{1,3}$ . В этой связи целесообразно иметь возможность регулирования максимальной потребляемой вальцами харвестерной головки мощности по нижней границе кривых УЧЭПП в зависимости от условий эксплуатации.

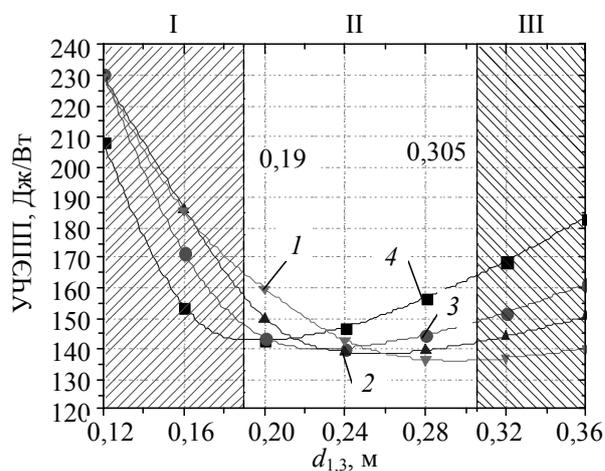


Рис. 3. Эффективность эксплуатации харвестера при различной мощности привода харвестерной головки:  
1 – 60 кВт; 2 – 50 кВт; 3 – 40 кВт; 4 – 20 кВт

Моделирование процесса колебаний харвестерной головки после прекращения протаскивания дерева по способу № 1 позволило определить действующие на опорной платформе манипулятора нагрузки при различной мощности привода валцов харвестерной головки, параметров деревьев и скорости протаскивания (рис. 4).

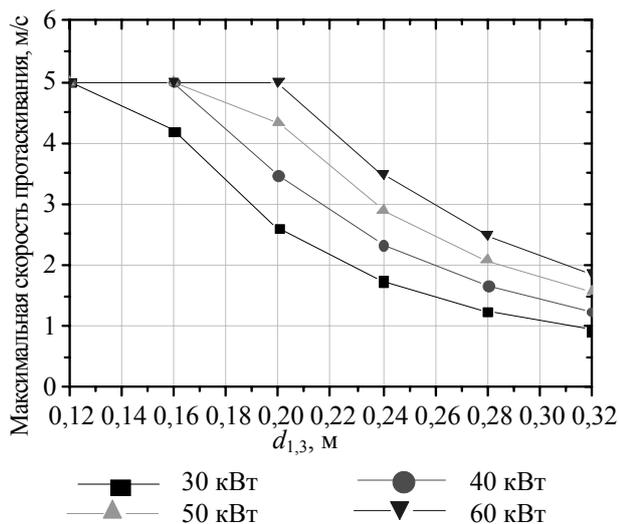


Рис. 4. Достижимая скорость обрезки сучьев с дерева при различной мощности привода валцов харвестерной головки

При определении максимально достигаемой скорости протаскивания дерева (рис. 4) принималось, что заготавливаются сортименты длиной 6 м, привод валцов харвестерной головки оборудован системой управления расходом гидравлической жидкости по нагрузке, максимальное развиваемое валцами тяговое усилие обеспечивает возможность обрезки сучьев с деревьев в рассматриваемом диапазоне диаметров  $d_{1,3}$ , а разгон дерева осуществляется без обрезания сучьев.

С увеличением мощности привода валцов харвестерной головки наблюдается возрастание нагруженности опорной платформы манипулятора для всего диапазона обрабатываемых деревьев (рис. 5).

Важно отметить, что наибольшая нагруженность платформы поворотным моментом достигается при торможении дерева с  $d_{1,3}$  меньше максимального. Это обусловлено различным влиянием скорости и массы движущегося дерева на кинетическую энергию, передаваемую на харвестерную головку при торможении и меньшей силой сопротивления волочению кроны дерева при меньших  $d_{1,3}$ . Максимальный поворотный момент при мощности привода валцов, равной 60 кВт, возникает при торможении дерева с  $d_{1,3} = 0,2$  м. Обработка деревьев максимального диаметра с использованием харвестерных головок малой мощности (менее 30 кВт), но достаточным тяговым усилием практически не приводит к развитию поворотного момента на платформе манипулятора. Большая часть энергии движущегося дерева при этом рассеивается силами волочения кроны по поверхности.

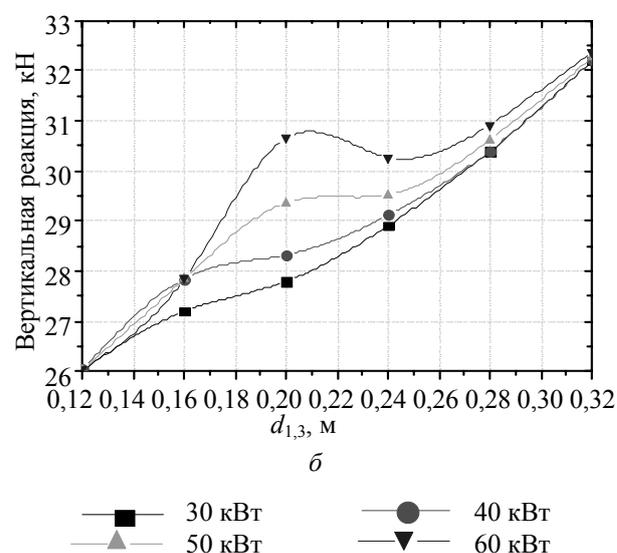
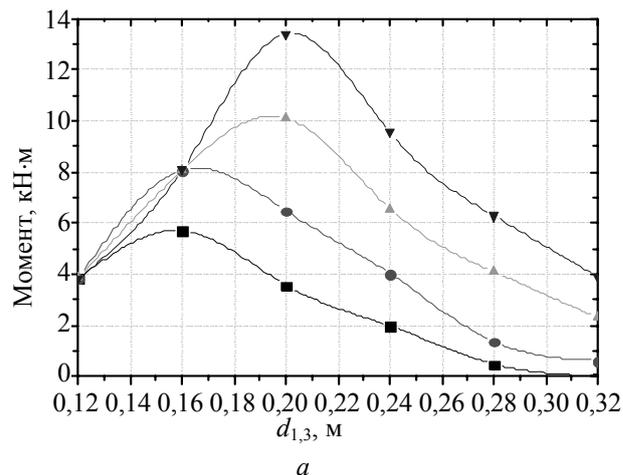


Рис. 5. Нагруженность опорной платформы манипулятора при торможении дерева  
а – поворотный момент; б – вертикальная реакция

Наряду с увеличением поворотного момента возрастает и вертикальная реакция на платформе манипулятора. Ее статическая составляющая нелинейно растет от 26,1 кН до 32,2 кН в диапазоне  $d_{1,3}$  0,12–0,32 м, что связано с некоторой нелинейностью между величиной диаметра дерева  $d_{1,3}$  и его массой  $m_{дер}$ . При формировании динамической составляющей наблюдаются качественные различия для протаскивания дерева головкой с приводом валцов различной мощности. С ее увеличением область максимальных значений динамической составляющей вертикальной реакции смещается в сторону больших  $d_{1,3}$ . Кроме того, увеличивается интенсивность нарастания динамической составляющей. При мощности привода валцов более 52 кВт максимальная динамическая составляющая столь велика, что суммарная вертикальная реакция для данного  $d_{1,3}$  оказывается большей, чем для нескольких последующих. Так, для привода мощ-

ностью 60 кВт максимальная динамическая составляющая вертикальной реакции наблюдается при  $d_{1,3} = 0,2$  м. Суммарная величина реакции при этом превышает таковую для последующих диаметров  $d_{1,3}$  деревьев вплоть до 0,27 м.

С учетом комплексного воздействия рассматриваемых нагрузок на опорную платформу манипулятора при анализе ее напряженно-деформированного состояния следует рассматривать несколько вариантов нагружения. Это процесс натяга дерева на максимальном вылете манипулятора при его различном положении относительно технологического модуля харвестера и торможение дерева при обрезке сучьев с  $d_{1,3}$ , соответствующим максимальной скорости протаскивания.

Проведенные исследования показали, что рациональная величина грузоподъемности форвардеров, во многом определяющая статическую и динамическую нагруженность их несущих конструкций, значительно зависит от условий движения и требуемого расстояния трелевки сортиментов. Так, при малых расстояниях трелевки (150–200 м) на грунтах со слабой несущей способностью увеличение грузоподъемности свыше 4000 кг для форвардеров 4К4 приводит к росту функции УЭПП, что означает снижение эффективности их использования (рис. 6). В случае увеличения расстояния трелевки до 450 м рационально использование форвардеров с большей грузоподъемностью (до 8000–9000 кг).

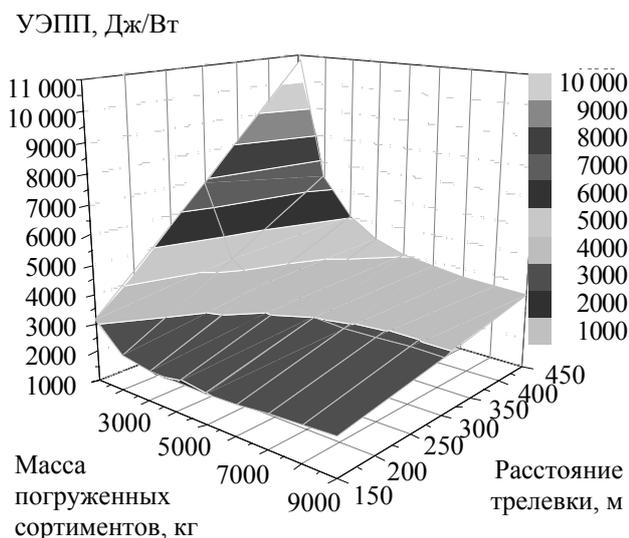


Рис. 6. Определение рациональной грузоподъемности форвардера 4К4 при различном расстоянии трелевки в условиях грунтов со слабой несущей способностью (3-й тип)

Существенное влияние на нагруженность несущих конструкций и эффективность реализации параметров форвардеров оказывают ре-

жимы выполнения погрузочно-разгрузочных операций. При этом наибольший интерес представляет определение рациональной скорости поднимания пачки сортиментов стрелой манипулятора (рис. 7).

С увеличением скорости подъема пачки сортиментов до 0,4 рад/с эффективность применения форвардера 4К4 грузоподъемностью 5000 кг интенсивно растет вне зависимости от расстояния последующей трелевки сортиментов.

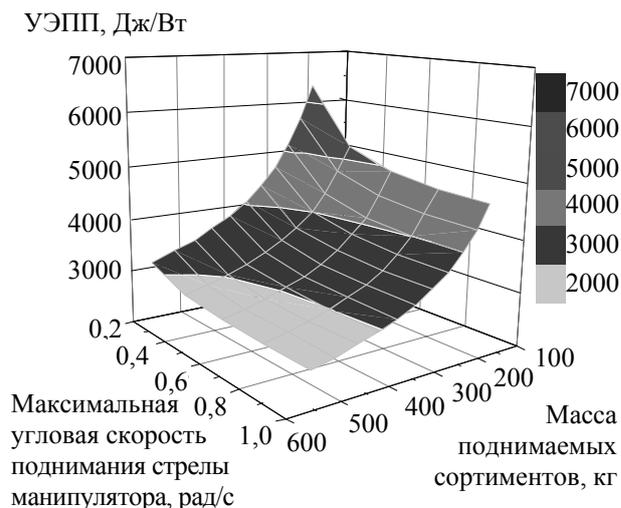


Рис. 7. Оценка рациональной скорости подъема сортиментов манипулятором форвардера 4К4 при различной массе пачки поднимаемых сортиментов

Максимальную скорость подъема стрелы манипулятора на вылете 5,3 м с грузом 468 кг рационально ограничить величинами: 0,7 рад/с при расстоянии трелевки 150 м и 0,55 рад/с при расстоянии трелевки 450 м. Дальнейшее увеличение максимальной скорости подъема стрелы манипулятора нецелесообразно, так как не вызывает роста эффективности эксплуатации форвардера и приводит лишь к возрастанию его динамической нагруженности на режиме торможения манипулятора. Для обеспечения рекомендуемых скоростей подъема стрелы манипулятора форвардера МЛПТ-354 при указанных массе пачки и вылете стрелы требуется обеспечение мощности привода гидроцилиндра подъема стрелы 33,7 кВт и 27,5 кВт соответственно.

**Заключение.** Предложена комплексная методика обоснования рациональных режимов выполнения технологических операций многооперационных лесозаготовительных машин и энергетических параметров привода технологического оборудования для их реализации, учитывающая различные способы выполнения

технологических операций, взаимовлияние показателей энергонасыщенности и производительности машин.

На основе разработанных методики и математической модели установлена взаимосвязь между энергетическими параметрами привода технологического оборудования многооперационной лесозаготовительной машины и нагруженностью их шарнирно-сочлененных несущих конструкций, которая позволила рекомендовать следующие эксплуатационные режимы работы машин и параметры привода их рабочих органов. В основном древостое с  $d_{1,3}$  до 0,23 м рационально использовать способ обрезки сучьев с непосредственной подачей дерева вальцами. При больших диаметрах ствола следует использовать способ обрезки сучьев с совмещением работы харвестерной головки и манипулятора, позволяющий увеличить диапазон обрабатываемых диаметров деревьев  $d_{1,3} = 0,29-0,32$  м, а в диапазоне  $d_{1,3} = 0,23-0,29$  увеличить полезно используемый энергетический потенциал машины в 1,01–1,09 раза, что позволяет снизить удельные затраты топлива на 0,02–0,18 кг/м<sup>3</sup> без изменения производительности работы. Рациональная мощность привода вальцов харвестерной головки для типичных рубок главного пользования в Республике Беларусь составляет 60 кВт, а тяговое усилие протаскивания дерева – 28 кН, что обеспечивает эффективную работу машины в древостоях с  $d_{1,3}$  до 0,32 м. При эксплуатации харвестера в древостое с  $d_{1,3} = 0,19-0,32$  м для повышения эффективности эксплуатации машины необходимо осуществлять автоматизированное регулирование максимальной мощности привода вальцов харвестерной головки от 20 кВт до 60 кВт, что в сравнении с нерегулируемым приводом позволит снизить затраты топлива до 0,14 кг/м<sup>3</sup>.

Установлена рациональная грузоподъемность форвардера с колесной формулой 4К4, которая для расстояния трелевки сортиментов, равного 250–300 м, в условиях 3-го типа грунтов составляет 7000–7500 кг. Максимальную скорость подъема сортиментов рационально ограничить величиной 0,4 рад/с для массы поднимаемых сортиментов 600 кг и 0,65 рад/с при массе 200 кг и вылете манипулятора 5,3 м.

## Литература

1. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear- and Shelterwood Cutting / L. Eliasson [et al.] // J. of Forest Engineering. – 1999. – Vol. 10, No. 1. – P. 43–48.
2. Analyzing and Estimating Delays in Harvester Operations / R. Spinelli [et al.] // J. of Forest Engineering. – 2008. – Vol. 19, No. 1. – P. 36–41.
3. Effect of Tree Size on Productivity and Time Required for Work Elements in Selective Thinning by a Harvester / M. Nakagawa [et al.] // J. of Forest Engineering. – 2007. – Vol. 18, No. 2. – P. 24–28
4. Сидоров, Б. А. Исследование процесса обрезки сучьев самоходной сучкорезной машиной ЛП-51 с непрерывной подачей: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Б. А. Сидоров. – Л., 1981. – 254 л.
5. Вороницин, К. И. Машинная обрезка сучьев на лесосеке / К. И. Вороницин. – М.: Лесная пром-сть. – 1982. – 79 с.
6. Букалов, Д. А. Совершенствование производства сортиментов путем обоснования выбора энергосберегающей системы машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Д. А. Букалов. – СПб., 2009. – 19 с.
7. Кочегаров, В. Г. Технология и машины лесосечных работ: учеб. для вузов / В. Г. Кочегаров, Ю. А. Бит, В. Н. Меньшиков. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 392 с.
8. Бердник, А. Г. Повышение эффективности сортиментной заготовки древесины с применением процессора / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / А. Г. Бердник. – Петрозаводск, 2006. – 21 с.
9. Гинзбург, Ю. В. Промышленные тракторы / Ю. В. Гинзбург, А. И. Швед, А. П. Парфенов. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
10. Федоренчик, А. С. Харвестеры: учеб. пособие / А. С. Федоренчик, И. В. Турлай. – Минск: БГТУ, 2002. – 172 с.
11. Голякевич, С. А. Моделирование нагруженности несущих конструкций харвестеров на транспортных и технологических операциях / С. А. Голякевич // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. – 2013. – Вып. I. – С. 42–46.

Поступила 20.02.2013