

УДК 630.377.4

## Анализ динамики элементов конструкции технологического оборудования поворотных лесопогрузчиков на основе математического моделирования

В.Ф. Полетайкин<sup>a</sup>, П.Г. Колесников<sup>b</sup>

Сибирский государственный технологический университет, Мира 82, Красноярск, Россия

<sup>a</sup>Poletaikin\_VF@mail.ru, <sup>b</sup>KolesnikovPG@mail.ru

Статья поступила 13.01.2014, принята 7.05.2014

*Переместительные операции в лесной промышленности остаются наиболее энергоемкими и трудоемкими. Одним из направлений совершенствования лесных подъемно-транспортных машин является создание и освоение серийного производства поворотных лесопогрузчиков с переменным вылетом груза, оснащенных телескопическими стрелами. Это обусловлено рядом их достоинств, таких, как улучшение условий труда оператора, повышение кинематической точности технологического оборудования, универсальность и более широкие технологические возможности. Одними из основных механизмов технологического оборудования поворотного лесопогрузчика с телескопической стрелой являются механизмы подъема и выдвигания секций телескопической стрелы. От обоснованности выбора параметров этих механизмов на стадии проектирования в значительной степени зависят надежность и эффективность работы машины, ее металлоемкость и энергоемкость. В работе рассмотрена методика построения математических моделей системы «рабочее оборудование – груз» поворотного лесопогрузчика с переменным вылетом груза с использованием уравнений Лагранжа второго рода. В процессе разработки математических моделей получены выражения кинетической энергии системы, дающие представление об энергоемкости технологических процессов заготовки древесного сырья. Разработанные математические модели позволяют на стадии проектирования определять оптимальные параметры технологического оборудования, прорабатывать различные варианты кинематических схем, повышать экономический эффект опытно-конструкторских работ.*

**Ключевые слова:** поворотный лесопогрузчик с переменным вылетом груза, математическая модель, кинетическая энергия системы, уравнения Лагранжа второго рода.

## Analysis of dynamics of elements of a design of processing equipment rotary loggers on the basis of the mathematical equipment

V.F. Poletaykin<sup>a</sup>, P.G. Kolesnikov<sup>b</sup>

Siberian State Technological University, 82 World str., Krasnoyarsk, Russia

<sup>a</sup>Poletaikin\_VF@mail.ru, <sup>b</sup>KolesnikovPG@mail.ru

Received 13.01.2014, accepted 7.05.2014

Operations on movement in the forest industry remain the most power-intensive and labor-consuming. One of the directions of improvement of forest hoisting-and-transport cars is creation and development of a mass production of rotary loggers with a variable departure of the freight, equipped with telescopic arrows. It is caused by a number of their advantages, such as improvement of working conditions of the operator, increase of kinematic accuracy of processing equipment, universality and more ample technological capabilities. One of the main mechanisms of processing equipment of a rotary logger with a telescopic arrow are mechanisms of lifting and promotion of sections of a telescopic arrow. Reliability and overall performance of the car, its metal consumption and power consumption substantially depends on validity of a choice of parameters of these mechanisms at a design stage. In work the technique of creation of mathematical models of system "the working equipment – freight" a rotary logger with a variable departure of freight with use of the equations Lagrange of the second sort is considered. In the course of development of mathematical models expressions of kinetic energy the systems giving an idea of power consumption of technological processes of preparation of wood raw materials are received. The developed mathematical models allow to determine optimum parameters of processing equipment at a design stage, to study various versions of kinematic schemes, to raise economic effect of developmental works.

**Keywords:** rotary logger with a variable departure of freight, mathematical model, kinetic energy of system, the equation Lagrange of the second sort.

**Введение.** В лесной промышленности в процессе реализации технологических процессов заготовки древесного сырья наиболее энергоемкими являются погрузочно-разгрузочные операции. Поворотные лесопогрузчики с переменным вылетом груза, оснащенные телескопическими стрелами, в технологических процессах заготовки древесного сырья в виде хлыстов и сортиментов в настоящее время находят все большее применение. Это обусловлено рядом их достоинств, таких, как улучшение условий

труда оператора, повышение кинематической точности технологического оборудования, универсальность и более широкие технологические возможности.

**Постановка и решение задачи.** Пуско-тормозные режимы работы технологического оборудования поворотного лесопогрузчика с телескопической стрелой характеризуются возникновением значительных динамических нагрузок, оказывающих влияние на нагруженность элементов конструкции, включая механизм выдвижения секции (МВС) и механизм подъема стрелы (МПС).

Целью представленной работы является разработка математических моделей движения технологического оборудования поворотных лесопогрузчиков, позволяющих на стадии проектирования определять оптимальные параметры МВС и МПС.

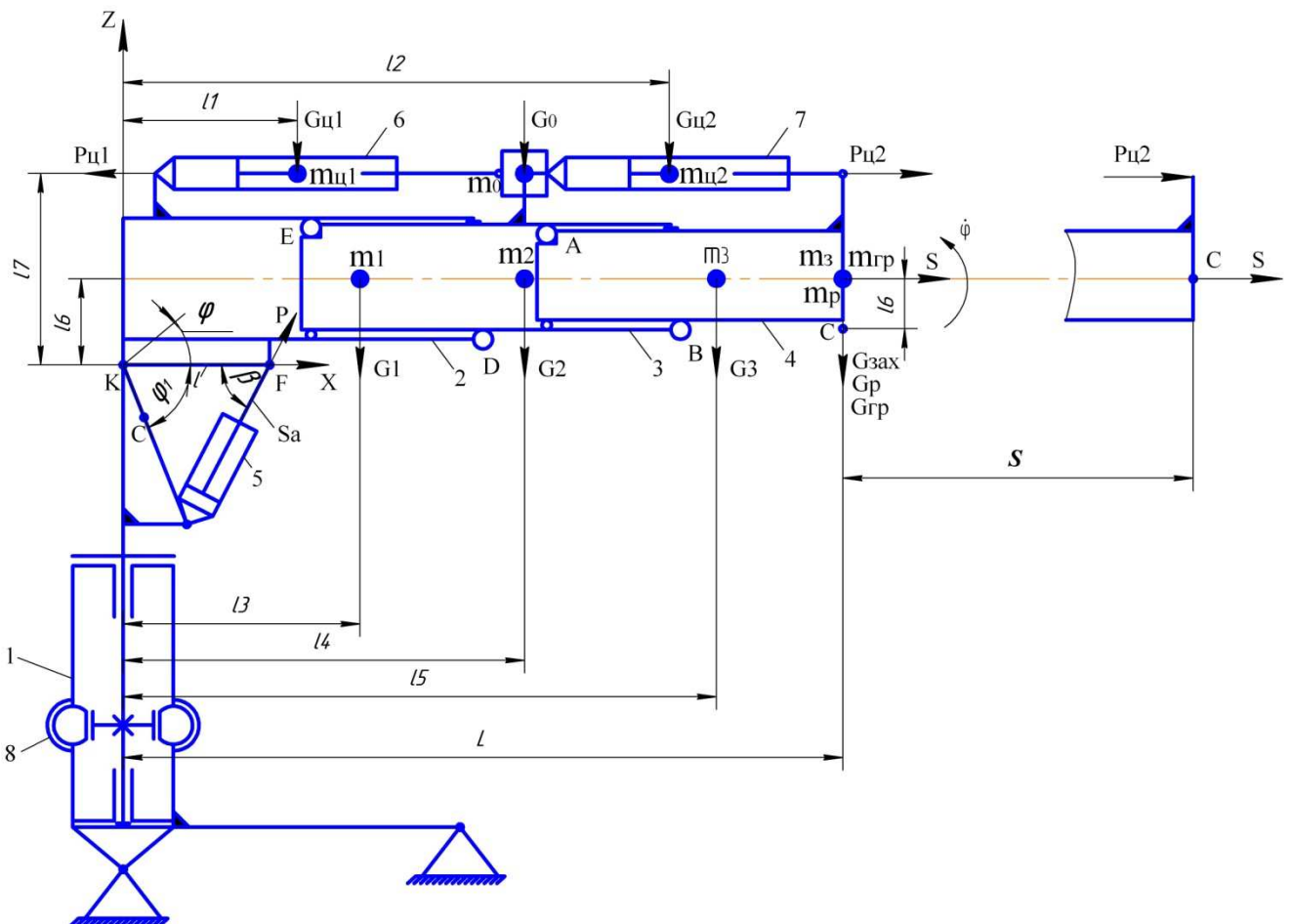
Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать эквивалентную схему динамической системы «технологическое оборудование – груз».
2. Обосновать расчетный режим работы поворотных лесопогрузчиков.

3. На основе уравнений Лагранжа второго рода разработать математические модели движения системы «технологическое оборудование – груз».

В процессе погрузки древесины возможны одновременное выдвижение секций и поворот технологического оборудования в продольно-вертикальной плоскости, а также выдвижение секций с одновременным поворотом технологического оборудования в горизонтальной плоскости относительно оси опорно-поворотного устройства. Эти режимы являются наиболее характерными для работы лесопогрузчика рассматриваемого типа, поэтому при обосновании параметров механизмов выдвижения секции и подъема стрелы они принимаются за основные.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема динамической системы «технологическое оборудование – груз». Рассматриваем режим поворота стрелы с грузом в плоскости  $XKZ$  на угол  $\varphi$  с одновременным выдвижением секций.  $\varphi$  – угол поворота стрелы с грузом относительно точки К. Совмещаем ось вращения стрелы с началом координат.  $S$  – перемещение груза, равное ходу телескопического устройства стрелы.



**Рис. 1.** Эквивалентная схема динамической системы «технологическое оборудование – груз»: 1 – опорно-поворотное устройство; 2 – наружная секция; 3 – средняя секция; 4 – внутренняя секция; 5 – гидроцилиндр поворота стрелы; 6, 7 – гидроцилиндры механизма выдвижения секции; 8 – механизм поворота колонны

На рисунке:  $G_1, G_2, G_3$  – силы тяжести наружной, средней и внутренней секций стрелы,  $H; G_p, G_{зax}, G_{гр}$

– силы тяжести ротора, захвата и груза, приведенные в точку С – точку подвеса ротора к стреле,  $H; G_0$  – части силы тяжести МВС, приведенные к центру массы

средней секции,  $H$ ;  $G_{u1}, G_{u2}$  – силы тяжести гидроцилиндров привода МВС,  $H$ .  $P_{u1}, P_{u2}$  – усилия на штоках гидроцилиндров привода МВС,  $H$ .

$P_{u1} = P_{u2}$ ;  $P$  – усилие на штоке гидроцилиндра подъема стрелы,  $H$ ;  $L$  – размер стрелы при втянутых секциях,  $m$ ;  $S$  – ход телескопического устройства стрелы,  $m$ ;  $\varphi$  – угол поворота стрелы в плоскости ХКЗ,  $rad$ ;  $\dot{\varphi}$  – угловая скорость вращения стрелы (скорость переносного движения),  $rad/sec$ ;  $\dot{S}$  – скорость поступательного (относительного) движения секций,  $m/c$ .

В соответствии с числом степеней свободы записываем два уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{S}} \right) - \frac{\partial T}{\partial S} = Q_s, \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi.$$

Здесь  $T$  – кинетическая энергия системы;  $Q_s$  – обобщенные силы, соответствующие обобщенной координате  $S$ ;  $Q_\varphi$  – обобщенные силы, соответствующие обобщенной координате  $\varphi$ .

По количеству поступательно движущихся масс перемещение телескопической стрелы с ходом  $S$  можно разделить на два периода. Первый период при  $0 \leq \Delta S \leq 0,5S$  – выдвигание средней секции совместно с внутренней секцией и грузом. Второй период при  $0,5S \leq \Delta S \leq S$  – выдвигание внутренней секции с грузом. Рассматриваем режим поворота стрелы с грузом в плоскости ХКЗ на угол  $\varphi$  с одновременным выдвиганием секций.

В соответствии с методикой разработки уравнений движения необходимо определить выражения кинетической энергии системы на двух этапах работы технологического оборудования.

Кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий движущихся масс:

$$T = \frac{1}{2g} \left\{ \dot{\varphi}^2 (G_1 \ell_3^2 + G_2 \ell_4^2 + G_3 \ell_5^2 + G_{u1} \ell_1^2 + G_{u2} \ell_2^2 + G_0 \ell_4^2 + (G_p + G_{зак} + G_{гр}) L^2) + \dot{S}^2 (G_2 + G_3 + G_{u1} + G_{u2} + G_0 + G_p + G_{зак} + G_{гр}) \right\} \quad (1)$$

Выражение (1) определяет величину кинетической энергии системы (технологического оборудования и груза) в момент трогания с места подвижных секций.

При неподвижных секциях, когда  $\dot{S} = 0$ , второе слагаемое равно нулю. При работе МВС на выдвигание секций некоторые линейные размеры  $\ell_i$  увеличиваются, происходит увеличение расстояний от центров масс элементов конструкции до оси вращения стрелы и, следовательно, увеличение моментов инерции масс и кинетической энергии системы.

Размеры  $\ell_1, \ell_3$  не изменяются. Размеры  $\ell_4, \ell_2$  увеличиваются на  $0,5S$ , размеры  $\ell_5$  и  $L$  на величину  $S$  – на величину хода телескопического устройства стрелы. Таким образом, в процессе одновременного

подъема и выдвигания секций стрелы кинетическая энергия системы изменяется: возрастает при выдвигании секций и уменьшается при их втягивании.

Начальное значение кинетической энергии:

$$T_n = \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} (G_1 \ell_3^2 + G_2 \ell_4^2 + G_3 \ell_5^2 + G_{u1} \ell_1^2 + G_{u2} \ell_2^2 + G_0 \ell_4^2 + (G_p + G_{зак} + G_{гр}) L^2) \quad (2)$$

Приращение кинетической энергии за счет поступательного движения масс при работе МВС в момент трогания подвижных секций:

$$T_n = \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_2 + G_3 + G'_{u1} + G_{u2} + G_0 + G_p + G_{зак} + G_{гр}) \quad (3)$$

Здесь  $G'_{u1}$  – сила тяжести подвижных частей гидроцилиндра выдвигания средней секции (шток в сборе с поршнем, проушиной и другими деталями).

$\dot{S}$  – скорость поступательного движения масс.

Принимаем  $G_{u1} = G_{u2}$ ,  $G'_{u1} = G'_{u2} = 0,5G_{u1} = 0,5G_{u2}$ . Определим приращение кинетической энергии системы за счет увеличения радиусов инерции масс при одновременной работе МВС и механизма подъема стрелы, то есть приращение кинетической энергии во вращательном движении. Процесс приращения происходит в два этапа. На первом этапе при  $0 \leq \Delta S \leq 0,5S$  увеличиваются радиусы инерции  $\ell_1, \ell_4, \ell_5, L$  и, соответственно, кинетической энергии масс  $\frac{G_0}{g}, \frac{G_{u2}}{g}, \frac{G_2}{g}, \frac{G_3}{g}, \frac{G_p}{g}, \frac{G_{зак}}{g}, \frac{G_{гр}}{g}$ . Кроме этого, происходит некоторое увеличение кинетической энергии подвижных частей  $G_{u1}$ .

На втором этапе, при  $0,5S \leq \Delta S \leq S$  происходит увеличение радиусов инерции  $\ell_5$  и  $L$  и кинетической энергии масс  $\frac{G_{зак}}{g}, \frac{G_3}{g}, \frac{G_p}{g}, \frac{G_{гр}}{g}$ . Происходит также увеличение кинетической энергии гидроцилиндра  $G_{u2}$  за счет перемещения штока и других подвижных его частей на  $0,5S$ . При этом центр масс всего гидроцилиндра перемещается на  $0,25S$ .

Кинетическая энергия системы во вращательном движении в конце первого этапа определяется следующим выражением:

$$T_{\theta 1} = \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} \left\{ (G_1 \ell_3^2 + G_{u2} \ell_2^2 + (G_2 + G_0) \ell_4^2 + G_3 \ell_5^2 + G_{u1} \ell_1^2 + (G_{зак} + G_p + G_{гр}) L^2) + [G_{u2} (\ell_2 S + 0,25S^2) + (G_2 + G_0) (\ell_4 S + 0,25S^2) + G_3 (\ell_5 S + 0,25S^2) + G_{u1} (0,5 \ell_1 S + 0,0625S^2) + (G_{зак} + G_p + G_{гр}) (LS + 0,25S^2)] \right\} \quad (4)$$

Начальное значение кинетической энергии во вращательном движении  $T_n$  определяется выражением (2). В выражении (4) – первое слагаемое. Таким образом, приращение кинетической энергии в конце первого этапа за счет увеличения радиусов инерции масс:

$$T_{np1} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u2}(\ell_2 S + 0,25 S^2) + (G_2 + G_0) \times (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_3(\ell_5 S + 0,25 S^2) + G_{u1}(0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) \times (LS + 0,25 S^2)] \quad (5)$$

Кинетическая энергия системы во вращательном движении в конце второго этапа определяется по выражению:

$$T_{e2} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} (G_1 \ell_3^2 + G_{u1} \ell_1^2 + (G_2 + G_0) \ell_4^2 + G_{u2} \ell_2^2 + G_3 \ell_5^2 + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) L^2) + \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u1} \times (0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_2 + G_0) (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_{u2} (1,5 \ell_2 S + 0,5625 S^2) + G_3 (2 \ell_5 S + S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) (2LS + S^2)] \quad (6)$$

В выражении (6) первое слагаемое – начальное значение кинетической энергии системы во вращательном движении. Второе слагаемое – приращение кинетической энергии во вращательном движении в конце хода телескопического устройства:

$$T_{np2} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u1}(0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_2 + G_0) \times (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_{u2}(1,5 \ell_2 S + 0,5625 S^2) + G_3(2 \ell_5 S + S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) (2LS + S^2)] \quad (7)$$

Рассмотрим процесс приращения кинетической энергии системы в поступательном движении при выдвигании секций посредством МВС. Данный процесс можно также разделить на два этапа: первый – при  $0 \leq \Delta S \leq 0,5S$ ; второй – при  $0,5S \leq \Delta S \leq S$ .

На первом этапе перемещения секций  $0 \leq \Delta S \leq 0,5S$  кинетическая энергия:

$$T_{n1} = \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{u1} + G_{u2} + G_0 + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \quad (8)$$

На втором этапе перемещение секций  $0,5S \leq \Delta S \leq S$ :

$$T_{n2} = \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_3 + 0,5G_{u2} + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \quad (9)$$

Полная кинетическая энергия системы «технологическое оборудование – груз» на каждом из этапов движения равна сумме кинетических энергий во вращательном и поступательном движении масс.

Таким образом, на первом этапе:

$$T_1 = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} \{ (G_1 \ell_3^2 + G_{u2} \ell_2^2 + (G_2 + G_0) \ell_4^2 + G_3 \ell_5^2 + G_{u1} \ell_1^2 + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) L^2) + [G_{u2} (\ell_2 S + 0,25 S^2) + (G_2 + G_0) (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_3 (\ell_5 S + 0,25 S^2) + G_{u1} (0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) (LS + 0,25 S^2)] \} + \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{u1} + G_{u2} + G_0 + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \quad (10)$$

На втором этапе:

$$T_2 = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} (G_1 \ell_3^2 + G_{u1} \ell_1^2 + (G_2 + G_0) \ell_4^2 + G_{u2} \ell_2^2 + G_3 \ell_5^2 + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) L^2) + \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u1} \times (0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_2 + G_0) (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_{u2} (1,5 \ell_2 S + 0,5625 S^2) + G_3 (2 \ell_5 S + S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) (2LS + S^2)] + \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_3 + 0,5G_{u2} + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \quad (11)$$

Для получения уравнений движения системы на первом этапе производим дифференцирование выражения (10) по составляющим уравнений Лагранжа. Частная производная по обобщенной координате  $S$ :

$$\frac{\partial T_1}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} \left\{ \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u2} (\ell_2 S + 0,25 S^2) + (G_2 + G_0) \times (\ell_4 S + 0,25 S^2) + G_3 (\ell_5 S + 0,25 S^2) + G_{u1} (0,5 \ell_1 S + 0,0625 S^2) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) \times (LS + 0,25 S^2)] \right\} = \frac{\dot{\Phi}^2}{2g} [G_{u2} (\ell_2 + 0,5S) + (G_2 + G_0) (\ell_4 + 0,5S) + G_3 (\ell_5 + 0,5S) + G_{u1} (0,5 \ell_1 + 0,125S) + (G_{зax} + G_p + G_{rp}) (L + 0,5S)] \quad (12)$$

Частная производная от кинетической энергии системы по обобщенным скоростям:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \dot{S}} = \frac{\partial}{\partial \dot{S}} \left[ \frac{\dot{S}^2}{2g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{u1} + G_0 + G_{u2} + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \right] = \frac{\dot{S}}{g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{u1} + G_0 + G_{u2} + G_p + G_{зax} + G_{rp}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial \dot{\varphi}} = & \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}} \left\{ \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + \ell_2 S + 0,25S^2) + \right. \\ & + (G_2 + G_0) (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + \\ & \left. + G_3 (\ell_5^2 + \ell_5 S + 0,25S^2) + \right. \\ & G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) \times \\ & \left. \times (L^2 + LS + 0,25S^2) \right\} = \frac{\dot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и2}} \times \\ & \times (\ell_2^2 + \ell_2 S + 0,25S^2) + (G_2 + G_0) \times \\ & \times (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + G_3 (\ell_5^2 + \ell_5 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + \\ & + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) (L^2 + LS + 0,25S^2)] \end{aligned} \quad (14)$$

Производные по времени от частных производных кинетической энергии по обобщенным скоростям:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_1}{\partial \dot{S}} \right) = & \frac{d}{dt} \left[ \frac{\dot{S}}{g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{\text{и1}} + G_0 + G_{\text{и2}} + \right. \\ & \left. + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) \right] = \frac{\ddot{S}}{g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{\text{и1}} + G_0 + \\ & + G_{\text{и2}} + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_1}{\partial \dot{\varphi}} \right) = & \frac{\ddot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + \ell_2 S + 0,25S^2) + \\ & + (G_2 + G_0) (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + \\ & + G_3 (\ell_5^2 + \ell_5 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) \times \\ & \times (L^2 + LS + 0,25S^2)] \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя результаты дифференцирования кинетической энергии (12), (15) и (16) в уравнения Лагранжа, получим уравнения движения системы для первого этапа  $0 \leq \Delta S \leq 0,5S$ :

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \frac{\ddot{S}}{g} (G_2 + G_3 + 0,5G_{\text{и1}} + G_0 + G_{\text{и2}} + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) - \right. \\ & - \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} [G_{\text{и2}} (\ell_2 + 0,5S) + (G_2 + G_0) (\ell_4 + 0,5S) + \\ & + G_3 (\ell_5 + 0,5S) + G_{\text{и1}} (0,5\ell_1 + 0,125S) + \\ & \left. + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) (L + 0,5S)] = Q_{S1} \right. \\ & \left. \frac{\ddot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + \ell_2 S + 0,25S^2) + (G_2 + G_0) \times \right. \\ & \times (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + G_3 (\ell_5^2 + \ell_5 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) \times \\ & \left. \times (L^2 + LS + 0,25S^2)] = Q_{\varphi1} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнение движения системы на втором этапе  $0,5S \leq \Delta S \leq S$  получим дифференцированием выражения (11) и подстановкой результатов в уравнения Лагранжа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{S}} = & \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} [G_{\text{и1}} (0,5\ell_1 + 0,125S) + (G_2 + G_0) \times \\ & \times (\ell_4 + 0,5S) + G_{\text{и2}} (1,5\ell_2 + 1,125S) + 2G_3 (\ell_5 + S) + \\ & + 2(G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) (L + S)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \dot{S}} = \frac{\dot{S}}{g} (G_3 + 0,5G_{\text{и2}} + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \dot{\varphi}} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{\varphi}} = & \frac{\dot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + \\ & + (G_2 + G_0) (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + 1,5\ell_2 S + 0,5625S^2) + \\ & + G_3 (\ell_5^2 + 2\ell_5 S + S^2) + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) \times \\ & \times (L^2 + 2LS + S^2)] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_2}{\partial \dot{S}} \right) = \frac{\ddot{S}}{g} (G_3 + 0,5G_{\text{и2}} + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_2}{\partial \dot{\varphi}} \right) = & \frac{\ddot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + \\ & + 0,0625S^2) + (G_2 + G_0) (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + 1,5\ell_2 S + 0,5625S^2) + \\ & + G_3 (\ell_5^2 + 2\ell_5 S + S^2) + \\ & + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) (L^2 + 2LS + S^2)] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \frac{\ddot{S}}{g} (G_3 + 0,5G_{\text{и2}} + G_p + G_{\text{зax}} + G_{\text{гp}}) - \right. \\ & \frac{\dot{\varphi}^2}{2g} [G_{\text{и1}} (0,5\ell_1 + 0,125S) + (G_2 + G_0) \times \\ & \times (\ell_4 + 0,5S) + G_{\text{и2}} (1,5\ell_2 + 1,125S) + \\ & + 2G_3 (\ell_5 + S) + 2(G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) (L + S)] = Q_{S2} \\ & \frac{\ddot{\varphi}}{g} [G_1 \ell_3^2 + G_{\text{и1}} (\ell_1^2 + 0,5\ell_1 S + 0,0625S^2) + \\ & + (G_2 + G_0) (\ell_4^2 + \ell_4 S + 0,25S^2) + \\ & + G_{\text{и2}} (\ell_2^2 + 1,5\ell_2 S + 0,5625S^2) + \\ & + G_3 (\ell_5^2 + 2\ell_5 S + S^2) + (G_{\text{зax}} + G_p + G_{\text{гp}}) \times \\ & \left. \times (L^2 + 2LS + S^2)] = Q_{\varphi2} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

Системы уравнений (17), (24) составляют основу математических моделей движения системы «рабочее оборудование – груз». Наложением условий функционирования и ограничений на параметры, характеризующие работу лесопогрузчика, получим полные математические

модели рассматриваемой динамической системы.

### **Выводы**

1. Полученные модели дают возможность на стадиях исследований и проектирования проводить обоснование оптимальных параметров типоразмерного ряда лесопогрузчиков.

2. Полученные выражения кинетической энергии (10), (11) позволяют установить зависимость кинетической энергии системы «технологическое оборудование – груз» от угла поворота  $\varphi$  и хода телескопической стрелы  $S$ , оценить влияние изменения кинетической энергии на динамическую нагруженность элементов конструкции, используя теорему об изменении кинетической энергии системы.

3. Математическое моделирование динамических процессов машин как метод оптимизации геометрических, кинематических и динамических параметров позволяет повысить экономический эффект опытно-конструкторских работ и технический уровень изделий машиностроения.

### *Литература*

1. Канунник И.А., Килина М.И. Основы механики роботов. Динамика промышленных роботов. Красноярск, СТИ, 1990. 64 с.
2. Емтыль З.К. Совершенствование кинематики, динамики и конструкции лесопромышленных гидроманипуляторов: автореф. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2001. 35 с.
3. Муратов В.С., Ильин В.Ф., Поддубный В.Ф. Динамические нагрузки гидроцилиндра лесопогрузчика и регулировка предохранительной аппаратуры // ЦНИИМЭ. Химки, 1980. 411 с.

### *References*

1. Kanunnik I.A. Kilina M. I. Bases of mechanics of robots. Dynamics of industrial robots, section II, Krasnoyarsk, STI, 1990. 64 p.
2. Emtil Z.K. Perfecting of kinematics, dynamics and design of timber industry hydromanipulators. The abstract on competition of a scientific degree of the Doctor of Engineering on special 05.21.01. Voronezh, 2001. 35 p.
3. Muratov V. S., Ilyin V. F. Poddubny V. F. Dynamic loadings of a hydraulic cylinder of a logger and adjustment of the safety equipment // TsNIIME. Khimki, 1980. 411 p.