

Шаров Андрей Викторович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: androsharo2014@yandex.ru.

Шерстюков Никита Александрович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nikita.sherstyukov@gmail.com.

Information about authors

Bartenev Ivan Mikhailovich – Professor of Forestry Mechanization department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Popikov Petr Ivanovich – Professor of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Sharov Andrey Victorovich – post-graduate student of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: androsharo2014@yandex.ru.

Sherstyukov Nikita Alexandrovich – post-graduate student of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: nikita.sherstyukov@gmail.com.

DOI: 10.12737/article_5b97a15dc46998.19876487

УДК 629.11.02/. 098

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ В ЕГО ПОДВЕСКЕ

доктор технических наук, профессор **В. И. Посметьев**¹

кандидат технических наук **В. О. Никонов**¹

кандидат физико-математических наук, доцент **В. В. Посметьев**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

Одним из перспективных и реализуемых способов повышения эффективности лесовозного автопоезда является оснащение их рекуперативными механизмами, обеспечивающими повторное использование в рабочем процессе непроизводительно рассеиваемой в окружающую среду энергии. Для оценки эффекта оснащения подвески лесовозного автопоезда накопителями энергии и определения оптимальных параметров последних разработана и исследована математическая модель движения лесовозного автопоезда на повороте и по неровной поверхности, характерных для лесовозных дорог. Моделирование основано на методах классической механики. Для исследования математической модели и для проведения компьютерных экспериментов по движению лесовозного автопоезда разработана компьютерная программа. С их помощью исследовано влияние параметров системы рекуперации, условий движения и параметров рельефа опорной поверхности на показатели эффективности системы рекуперации. Выполнены расчеты отклонения от равновесного положения всех шести колес лесовозного автопоезда, а также суммарной рекуперлируемой мощности в зависимости от времени. Получены зависимости влияния на рекуперлируемую мощность диаметра гидроцилиндров в подвеске при повороте лесовозного автопоезда, при различных диаметрах гидроцилиндров, скорости движения лесовозного автопоезда в повороте, времени при различной скорости прохода поворота. Выявлено, что оснащение лесовозного автопоезда системой рекуперации позволит при движении с частыми поворотами запасать мощность от 1 до 7 кВт. Определен оптимальный диаметр гидроцилиндров, который составил 50-60 мм.

Также установлено, что с увеличением скорости движения лесовозного автопоезда существенно возрастает эффективность системы рекуперации, причем она не ухудшает устойчивость лесовозного автопоезда на резких поворотах до скорости движения 90 км/ч.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, гидропривод, подвеска, рекуперация энергии, пневмогидравлический аккумулятор, неровности дороги, имитационное моделирование.

THE RESULTS OF COMPUTER SIMULATION OF FORESTRY LOG TRUCKS MOTION WITH ENERGY RECOVERY IN ITS SUSPENSION

DSc in Engineering, Professor **V. I. Posmetev**¹

PhD in Engineering **V. O. Nikonov**¹

PhD in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor **V. V. Posmetev**¹

¹ – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

Abstract

One of the most promising and realizable ways to increase the efficiency of log trucks is to equip them with recuperative mechanisms that ensure the repeated use of energy in the work process that is unproductively dispersed into the environment. To assess the effect of equipping the log truck with energy accumulators and determining the optimal parameters of the latter one, a mathematical model of the movement of a log truck motion on a bend and along an uneven surface which are typical for logging roads has been developed and investigated. Modeling is based on the methods of classical mechanics. A computer program has been developed to study the mathematical model and conduct computer experiments on the movement of log truck. The influence of the parameters of the recovery system, driving conditions and relief surface parameters on the efficiency indicators of the recovery system has been investigated with their help. Calculations of the deviation from the equilibrium position of all six wheels of a log truck have been made, as well as calculation of total recuperative power depending on time. Dependences of the effect of the diameter of the hydraulic cylinders on the recovered power in the suspension during the turn of a log truck have been got at different diameters of hydraulic cylinders, speed of log truck in the turn, and the time at various speeds of the turn. It was revealed that the equipment of a log truck with the recovery system will allow storing power from 1 to 7 kW when driving with frequent turns. The optimum diameter of hydraulic cylinders has been determined, which was 50-60 mm. It has also been established that with an increase in the speed of a log truck, efficiency of recovery system is substantially increased, and it does not impair the stability of log truck on sharp turns to a speed of 90 km/h.

Keywords: log truck, hydraulic drive, suspension, energy recovery, pneumohydraulic accumulator, road irregularities, simulation.

Введение

При наезде ходовой частью лесовозного автомобиля (ЛА) на препятствия и неровности на лесовозной дороге возникают продольные и поперечные колебания. Известно, что для ЛА, движущихся по пересеченной местности, на колебания ЛА расходуются до 30 % топлива, энергия которого, рассеивается через основные элементы подвески в виде тепла в окружающее пространство. Проблеме снижения расхода топлива и токсичности их выхлопных газов все еще не уделяется надлежащего внимания в числе других проблем совершенствования ЛА, таких как увеличение производительности, уменьшение массы и себестоимости транспортной работы, повышение

срока эксплуатации. Тем не менее, в связи с быстрым ростом стоимости энергоресурсов одним из главных направлений повышения эффективности ЛА стала экономия топлива.

Результаты многочисленных исследований подтверждают перспективность направления по снижению расхода топлива ЛА и токсичности их выхлопных газов на основе разработки и создания подвесок с рекуперативными механизмами.

Zhigang Fang, Хуесун Guo и Lin Xu (2013) провели исследование основных характеристик рекуперации гидравлической энергии при демпфировании амортизатора транспортного средства, которые показали, что с увеличением частоты возбу-

ждения колебаний в амортизаторе происходит снижение эффективности рекуперации энергии [1].

Han Zhang (2014) в работах для накопления энергии при движении транспортного средства по неровностям дороги предлагает оригинальную конструкцию рекуперативной гидравлической подвески, для исследования основных параметров которых на первом этапе приводит ее математическую модель, которая позволила выявить закономерности изменения значений колебаний подвески на давление зарядки и объем пневмогидравлического аккумулятора (ПГА), а на втором этапе для проверки результатов моделирования использует разработанный испытательный стенд [2, 3].

Wang Ruochen (2017) в статье приводит новый тип гидропривода транспортного средства, позволяющий улучшить его динамические характеристики и осуществлять рекуперацию гидравлической энергии в подвеске. Для исследования этого гидравлического привода разработана динамическая модель, позволяющая изучать влияние неровностей дорожного покрытия на динамические характеристики подвески и количество накапливаемой гидравлической энергии в ПГА [4].

Chen Long (2017) в своей работе описывает конструкцию гидравлической рекуперативной подвески. Для исследования динамических характеристик транспортного средства и количества рекуперированной энергии при использовании этой подвески проводились имитационные эксперименты в среде моделирования AMEsim / Simulink, на основании которых были определены оптимальные геометрические параметры гидравлического цилиндра, позволяющие накапливать наибольшее количество гидравлической энергии [5].

Junyi Zou и Xuexun Guo (2017) в статье представляют новую конструкцию гидравлического рекуперативного амортизатора подвески транспортного средства, математическую модель описания изменения основных характеристик рассматриваемой подвески. Выявлено, что количество рекуперированной энергии можно изменять за счет варьирования демпфированием [6].

В исследованиях Ming Peng (2016) и Junyi Zou (2018) предлагается гидравлический рекуперативный гидропривод с накопителем гидравлической энергии

в подвеске транспортного средства. На основе математического моделирования движения транспортного средства по дороге получены зависимости значений накапливаемой гидравлической энергии от характеристик неровностей дороги. Полученные результаты подтвердили преимущества предлагаемой подвески в сравнении с традиционной конструкцией [7, 8].

Почти все перечисленные выше работы не имеют непосредственного отношения к рекуперативным топливосберегающим механизмам автомобилей используемых при перевозке леса. Несмотря на кажущуюся простоту рассмотренных устройств, в настоящее время все еще нет удовлетворительных концепций и схемных решений применительно к ЛА. Это вызвано отсутствием углубленных научных исследований по обоснованию рабочих и конструктивных параметров энергосберегающих систем ЛА, как при движении, так и с учетом технологии выполняемых работ при погрузке-разгрузке.

На основе анализа результатов, полученных при изучении состояния вопроса, авторами была предложена конструкция ЛА с рекуперативным гидроприводом, в котором механизмом рекуперации энергии является подвеска, использующая энергию колебаний рамы [9-11].

Материалы и методы

Для оценки эффекта оснащения подвески лесовозного автопоезда (ЛА) накопителями энергии и определения оптимальных параметров последних разработана математическая модель для исследования движения ЛА на повороте и по неровной поверхности. Математическое моделирование базируется на методах классической механики [12-17]. В разработанной математической модели ЛА представлен как движущееся в трехмерном пространстве твердое тело, испытывающее силовое воздействие со стороны опорной поверхности в шести точках – со стороны колес (рис. 1).

ЛА обладает массой m и моментом инерции J , вычисляемым для текущей оси вращения в любой момент времени. Расположение ЛА в пространстве устанавливается декартовыми (x, y, z) координатами тяжести, углами смещения локальной системы координат $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ от базовой. Передвижение ЛА в математической модели представляется системой дифференциальных уравнений, сформированной на осно-

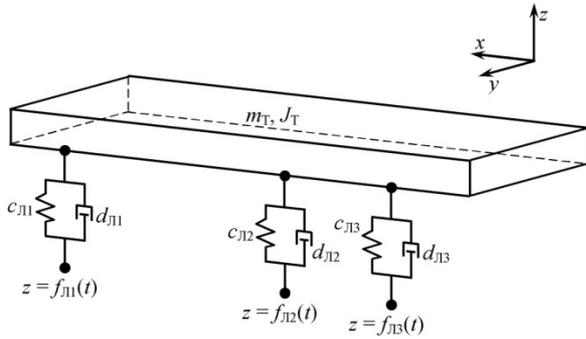


Рис. 1. Расчетная схема для создания динамической модели ЛА (показаны только колеса левого борта)

вании главных законов динамики вращательного и поступательного движения:

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^x + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^x; \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^y + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^y; \\ m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -m_k \cdot g + \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^z + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^z; \\ J_x \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Пi}); \\ J_y \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Пi}); \\ J_z \frac{\partial^2 \varphi_z}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Пi}), \end{cases} \quad (1)$$

где t – время; $F_{Пi}$ и $F_{Лi}$ – силы, воспринимаемые подвеской от колес по правому борту («П») и по левому борту («Л»); M^i – моменты вышеперечисленных сил относительно оси i .

Для предварительных исследований применяли упрощенную математическую модель колеса:

не учитывали возникновение деформации колеса и полагали, что функционирование подвески ЛА приводит к изменению просвета между опорной поверхностью и корпусом ЛА. Сила опоры действующая на корпус ЛА от колеса определялась в приближении вязкоупругого взаимодействия:

$$F_i^z = c_i(z_{Пi}(x_i, y_i) + R_K - z_{Ki}) - d_i \left(\frac{\partial z_{Пi}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{Ki}}{\partial t} \right), \quad (2)$$

где i – номер колеса;

$z_{Пi}(x, y)$ – вертикальная координата плоскости под колесом, одинаковая с координатой нижней точки колеса;

z_{Ki} – вертикальная координата точки закрепления колеса ЛА к корпусу; R_K – радиус закрепленного колеса;

d_i, c_i – коэффициенты демпфирования и жесткости вязкоупругого взаимодействия.

На колеса ЛА воздействуют силы сцепления при взаимодействии в горизонтальной плоскости с дорожным покрытием лесовозной дороги. При этом поперечная составляющая сил сцепления с дорожным покрытием обеспечивает устойчивое положение ЛА от опрокидывания. Также со стороны ведущих колес ЛА происходит воздействие на корпус силы тяги. Взаимодействуя в совокупности, указанные силы и приводят к перемещению модельного ЛА в трехмерном пространстве.

Система уравнений движения ЛА представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка и, в общем случае, не имеет аналитического решения. Из-за необходимости подстановки неаналитических возмущающих функций, действующих со стороны опорной поверхности. Поэтому для решения данной системы дифференциальных уравнений используется универсальный численный метод Рунге-Кутты второго порядка, который позволяет решать перечисленные задачи с необходимой точностью.

Численное решение дифференциальных уравнений заключается в дискретизации времени t на равные шаги, нумеруемые переменной τ , с длиной шага Δt . На каждом шаге интегрирования рассчитываются силы и моменты, действующие на тела, то есть правые части системы уравнений (1). После этого, по известным координатам и скоростям движения тел на текущем шаге интегрирования рассчитываются координаты и скорости тел на следующем шаге интегрирования. В частности, для x -декартовой составляющей численное интегрирование производится по формулам

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (3)$$

где x_{τ} и $v_{x\tau}$ – координата и скорость движения ЛА массой m вдоль декартового направления x на предыдущем шаге интегрирования по времени τ ; x_{τ} и $v_{x\tau}$ – то же, на последующем шаге интегрирования по времени $\tau + 1$.

По мере пересчета предыдущих координат и скоростей в последующие, получают таблично заданные функции зависимости от времени координат и углов ориентации ЛА. Далее выполняется ана-

лиз этих функций для оценки особенностей частоты колебаний корпуса ЛА, наклона и амплитуды.

При изучении поворота ЛА применяли ровную горизонтальную опорную поверхность (приведенные на рис. 2 функции $f_i(t)$ в этом случае были тождественно равны нулю. Для исследования движения ЛА в прямолинейном направлении по сложному рельефу (например, грунтовая дорога, лесовозная дорога) в модели считали, что рельеф опорной поверхности состоит из выступов двух типов: «холмов», имеющих большую протяженность (порядка 2-5 м) и «препятствий» (имитирующих пни, камни, выступающие корни), имеющих малую протяженность (порядка 0,2-0,5 м) (рис. 2).

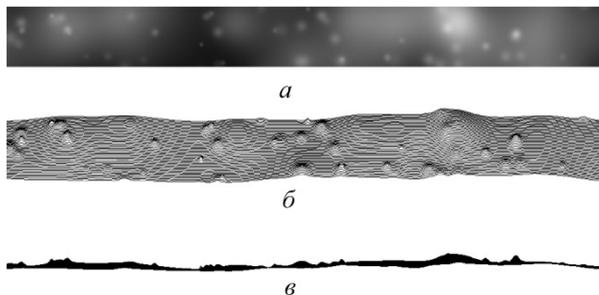
В рамках модели задавали функцию высоты поверхности от координат точки контакта $z(x, y)$, как суперпозицию гауссовских пиков с параметрами (x_i, y_i) (положение «холма» или «препятствия»), σ_i (среднеквадратическое отклонение, указывающее ширину препятствия) и H_i (высота выступа):

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{N_x+N_n} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (4)$$

где N_x – число холмов,

N_n – число препятствий.

Гауссовы пики распределялись по длине и ширине исследуемого участка (500×5 м) на основе равномерного закона случайным образом. Одновременно с этим значение параметров σ_i и H_i аналогично выбирались случайным образом на основе равномерного закона из следующих интервалов: от 0,05 до 0,15 м для σ_i и от 0 до 0,1 м для H_i . Число гауссовых пиков, имитирующих выступы – «препятствия», рассчитывалось в соответствии со статистическими таблицами параметров для различных типов поверхностей.



a – вид сверху, $б$ – вид под углом, $в$ – вид сбоку
Рис. 2. Изображения сгенерированного в модели участка опорной поверхности размерами 50×5 м

В результате поворота ЛА, его скорость не изменялась, и в наиболее значимых экспериментах принимала значение 60 км/ч. Через 3 с после начала моделирования выполнялся поворот передних колес согласно графику управления (рис. 3). Длительность поворота передних колес составляла 1 с, а поворот изменялся до значения $\alpha_{\max} = 20^\circ$. В текущем состоянии происходило удержание передних колес ЛА в течение 2 с, после выполнялся плавный поворот передних колес в начальное положение с аналогичной по модулю скоростью поворота. Управляя таким образом передними колесами ЛА выполнял плавный поворот.

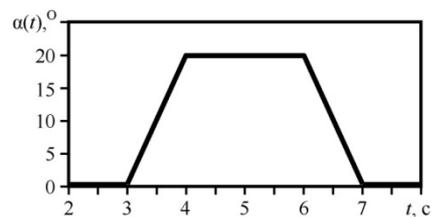


Рис. 3. Изменение угла поворота передних колес ЛА $\alpha(t)$ для реализации поворота в компьютерном эксперименте

Так как цель данной работы заключается в оценке возможности рекуперирования энергии при движении ЛА, выходные характеристики представляли собой рекуперированную мощность. На каждом шаге численного интегрирования вычислялось мгновенное значение рекуперированной мощности

$$N_p(t) = \sum_{i=1}^6 (v_{zK_i})^2 d_0 \left(\frac{D_{zU}}{D_{zU0}}\right)^2, \quad (5)$$

где i – номер колеса;

v_{zK_i} – составляющая скорости вдоль декартового направления z точки крепления колеса;

d_0 – эффективный коэффициент демпфирования от эталонного рекуперативного гидроцилиндра диаметром $D_{гц0}$ (в большинстве расчетов использовалось значение 50 мм);

$D_{гц}$ – диаметр исследуемого рекуперативного гидроцилиндра.

После проведения компьютерного эксперимента по функции $N_p(t)$ определялись два показателя:

$$N_{pM} = \max_{t_{ин} < t < t_{кн}} (N_p(t)); \quad (6)$$

$$N_{pC} = \frac{1}{t_{кн} - t_{ин}} \int_{t_{ин}}^{t_{кн}} N_p(t) dt, \quad (7)$$

где N_{pm} и N_{pc} – максимальная и средняя за время поворота рекуперированная мощность;

$t_{ни}$ и $t_{кп}$ – моменты времени, в которые начинается и завершается поворот.

Приведенные величины далее применяются в виде критериев оптимизации основных параметров рекуперативной системы. Для удобства изучения представленной математической модели и для выполнения компьютерных экспериментов по перемещению ЛА по лесовозной дороге создана компьютерная программа «Программа для моделирования перемещения ЛА по лесовозной дороге», выполненная на языке программирования Object Pascal в среде Borland Delphi 7.

Программа позволяет выполнять моделирование движения ЛА по неровной опорной поверхности в одном направлении или с поворотом с целью определения колебаний ЛА и расчета мощности, которую можно получить в подвеске за счет установки рекуперированных элементов, сглаживающих колебания.

Функциональные возможности программы: проведение компьютерного эксперимента по движению ЛА по ровной поверхности по заданному радиусу поворота; проведение компьютерного эксперимента по движению ЛА без изменения направления по неровной опорной поверхности с заданными параметрами неровностей; задание параметров ЛА: геометрических (в зависимости от конструкции), кинематических (скорость движения), динамических (массы и моменты инерции ЛА и колес), конструктивных (коэффициенты жесткости и демпфирования для взаимодействия колес с опорной поверхностью); вывод на экран в процессе моделирования схематичного изображения в трех проекциях ЛА, графиков зависимости от времени положения центра тяжести ЛА, отклонения колес, мгновенной рекуперированной мощности, а также текущих значений показателей эффективности).

Основные технические ограничения компьютерной программы: шаг интегрирования дифференциальных уравнений не более 0,0005 с; скорость движения ЛА при повороте не более 90 км/ч. Компьютерная программа предназначена для использования на компьютере с процессором не ниже Pentium 2,3 ГГц и объемом оперативной памяти не менее 1024 Мб. Исходный текст программы имеет объем 26 Кб.

Разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние множества геометрических, физических, конструктивных параметров на эффективность системы рекуперации ЛА. Первая группа входных переменных представляет собой параметры системы рекуперации, к которым относятся: $D_{гц}$ – диаметр рекуперативного гидроцилиндра в подвеске; $V_{ПГА}$ – объем ПГА. Ко второй группе входных переменных модели относятся условия движения ЛА: v – скорость движения; α_{max} – максимальный угол поворота колес; $t_{пов}$ – длительность поворота. Третья группа входных переменных представляет собой параметры рельефа опорной поверхности: h_{min} и h_{max} – минимальная и максимальная высоты неровностей; σ_{min} и σ_{max} – минимальная и максимальная длины неровностей. К показателям эффективности системы рекуперации относятся два показателя, рассчитываемые по функции $N_p(t)$ зависимости рекуперированной мощности от времени: N_{pm} – максимальное за время компьютерного эксперимента значение рекуперированной мощности; N_{pc} – среднее за время компьютерного эксперимента значение рекуперированной мощности.

Ниже решается следующая задача оптимизации: диаметр рекуперативного гидроцилиндра $D_{гц}$ в подвеске должен обеспечивать максимум средней рекуперированной мощности в процессе движения ЛА:

$$N_{pc}(D_{гц}) \rightarrow \max. \quad (8)$$

Последующее теоретическое исследование сводится к изучению влияния параметров системы рекуперации, условий движения и параметров рельефа опорной поверхности на показатели эффективности системы рекуперации.

Результаты и обсуждения

Компьютерное моделирование движения ЛА производилось следующим образом. В начальный момент времени ЛА помещался в начале координат, на некоторой незначительной высоте над опорной поверхностью (рис. 4, а). С началом интегрирования уравнений движения ЛА опускался на поверхность под действием силы тяжести, совершал колебания в вертикальном направлении и покачивания в вертикальной продольной плоскости (рис. 4, б) и приходил в устойчивое положение (рис. 4, в). Затем ЛА сообщалась заданная скорость движения (для приведенных ниже расчетов 60 км/ч) и выдерживалась постоянной

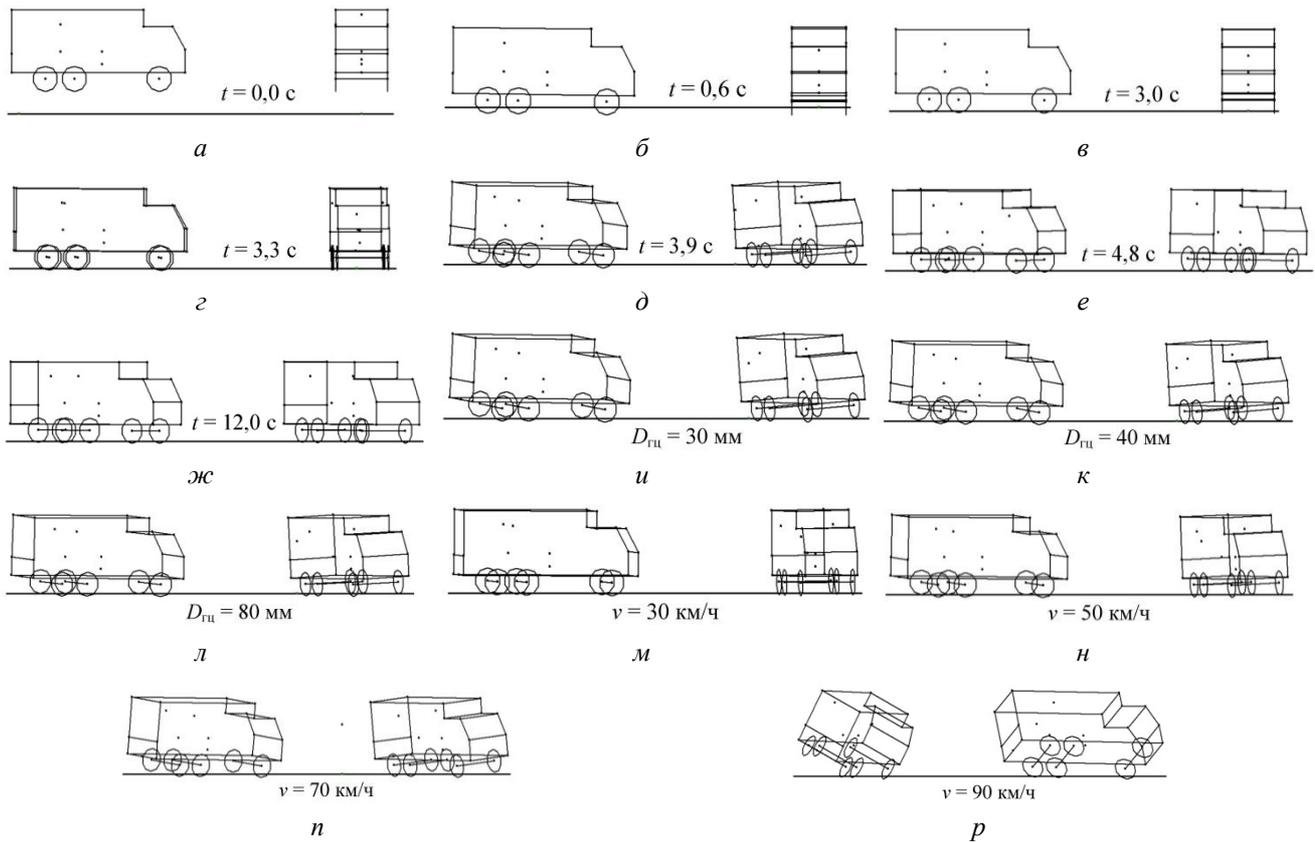


Рис. 4. Компьютерное моделирование движения ЛА:

а-ж – изменение состояния ЛА в компьютерном эксперименте по повороту; *и-л* – момент наибольшего наклона ЛА при повороте при различных значениях диаметра $D_{гц}$ рекуперативных гидроцилиндров в подвеске; *м-р* – момент наибольшего наклона ЛА при различных значениях скорости движения v

в течение всего компьютерного эксперимента.

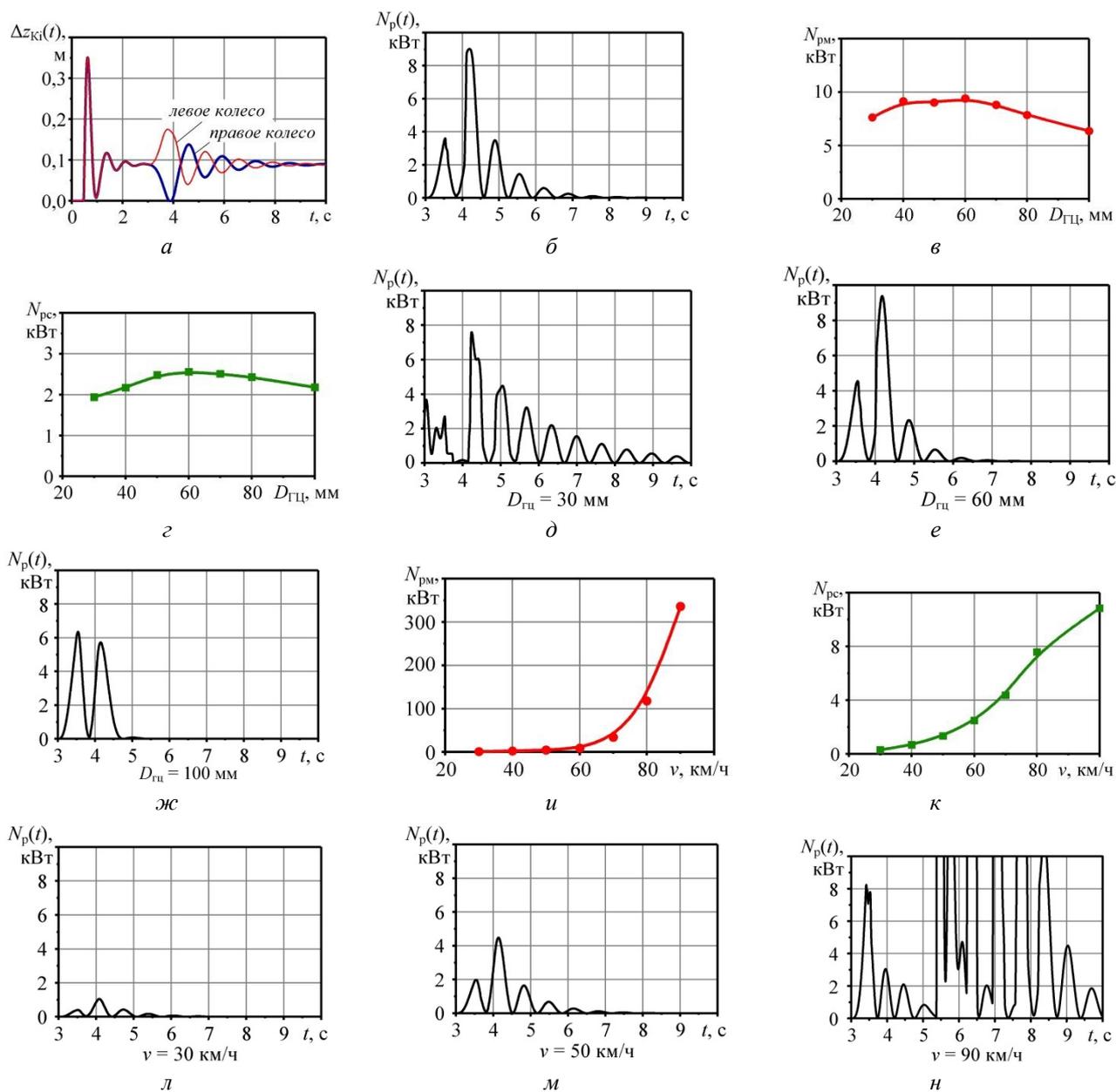
В момент времени 3 с начался поворот колес ЛА (рис. 4, *г*). При повороте с высокой скоростью ЛА испытывал существенный боковой крен (рис. 4, *д*). После завершения поворота ЛА некоторое время совершал колебательные движения, которые быстро затухали (рис. 4, *е*). Спустя 12 с после начала моделирования ЛА, движущийся прямолинейно, но уже в другом направлении, приходил в равновесное состояние (рис. 4, *ж*).

В течение компьютерного эксперимента рассчитывалось отклонение от равновесного положения всех шести колес ЛА (рис. 5, *а*). В ходе приведения ЛА в первоначальное равновесное состояние ($t = 0-3$ с) колеса совершали затухающие колебания относительно корпуса ЛА (начальный участок графиков $\Delta z_{кi}(t)$). После начала поворота вправо увеличивалось отклонение колес левого борта (рис. 5, тонкая линия, $t = 3-4$ с), и уменьшалось отклонение правого борта

(рис. 5, *а* толстая линия, $t = 3-4$ с). В ходе поворота и некоторое время после его завершения ЛА раскачивался, преимущественно в боковом направлении, из-за чего на графиках наблюдаются затухающие $\Delta z_{кi}(t)$ колебания.

На основе скоростей вертикального движения колес рассчитывалась суммарная рекуперированная мощность, зависимость которой от времени имеет следующий вид (рис. 5, *б*). Благодаря колебательным движениям в подвеске рекуперативные гидроцилиндры перекачивали рабочую жидкость в ПГА, поэтому на графике $N_p(t)$ отчетливо выделяются затухающие колебательные пики.

Максимальное значение рекуперированной мощности при повороте на 30 градусов со скоростью 60 км/ч за время 4 с составляют около 9 кВт, при длительности каждого из затухающих пиков около 0,5 с. Поэтому оснащение ЛА системой рекуперации позволяет при движении с частыми поворотами запасать



а – зависимость от времени t отклонений $\Delta z_{ки}$ колес средней оси от положения равновесия; б – зависимость от времени t суммарной рекуперированной мощности $N_p(t)$ от шести рекуперативных элементов в колесах; в, г – влияние диаметра рекуперативных гидроцилиндров в подвеске на максимальное $N_{рм}$ и среднее $N_{рс}$ значения рекуперированной мощности при повороте ЛА; д-ж – зависимость от времени t суммарной рекуперированной мощности $N_p(t)$ при различных диаметрах гидроцилиндров; и, к – влияние скорости v движения ЛА в повороте на максимальное $N_{рм}$ и среднее $N_{рс}$ значения рекуперированной мощности; л-н – зависимость от времени t суммарной рекуперированной мощности $N_p(t)$ при различной

Рис. 5. Результаты компьютерного эксперимента движения ЛА при различных условиях

усредненную мощность порядка 1-4 кВт, в зависимости от характера поворота.

От диаметра рекуперативных цилиндров в подвеске, с одной стороны, зависит интенсивность накачивания рабочей жидкости, с другой стороны, –

эффективность гашения неблагоприятных колебаний массы ЛА. С целью изучения влияния диаметра рекуперативных гидроцилиндров $D_{гц}$ провели серию компьютерных экспериментов, в которой переменной $D_{гц}$ придавали значения 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 мм.

Обнаружено, что наибольшую рекуперлируемую мощность (как максимальную, так и среднюю) можно получить при диаметре гидроцилиндров 50-60 мм, о чем свидетельствует местоположение максимума на графиках $N_{рм}(D_{гц})$ и $N_{рс}(D_{гц})$ (рис. 5, в и з). С увеличением диаметра гидроцилиндров усиливается гашение колебаний корпуса (рис. 4, л, 5, ж), из-за чего накачивание рабочей жидкости в рекуперативных гидроцилиндрах происходит менее эффективно из-за малой амплитуды хода подвески. С уменьшением же диаметра гидроцилиндров амплитуда хода поршня в гидроцилиндрах увеличивается из-за существенных колебаний корпуса (рис. 4, и, 5, д), однако из-за малого диаметра гидроцилиндра уменьшается объем рабочей жидкости, перекачиваемый за каждое рабочее движение поршня гидроцилиндра.

Таким образом, оптимальный диаметр гидроцилиндров в подвеске, при котором рекуперлируется наибольшая мощность при достаточно эффективном гашении колебаний корпуса, составляет 50-60 мм.

С увеличением скорости движения ЛА можно ожидать интенсификации колебательных процессов в подвеске, и соответственно увеличения рекуперлируемой мощности. Для изучения влияния скорости v движения ЛА в повороте на рекуперлируемую мощность проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли v от 30 до 90 км/ч с шагом 10 км/ч. При этом передние колеса ЛА поворачивались на один и тот же угол 20° , время поворота было так же постоянным и составляло 4 с. Состояние ЛА в моменты наибольшего наклона показано на рис. 4, м-р. Поворот с данными параметрами довольно резкий, поэтому начиная с 70 км/ч колеса ЛА по правому борту (при повороте направо) отрываются от опорной поверхности, хотя до скорости 90 км/ч после завершения поворота колеса снова касаются опорной поверхности и ЛА не опрокидывается. Случаи для скоростей 70 и 90 км/ч не могут рассматриваться как соответствующие условиям реальной эксплуатации ЛА, однако приведены для анализа закономерности и иллюстрации возможностей разработанной модели. В дальнейшем возможно также теоретическое исследование по влиянию системы рекуперации на устойчивость к опрокидыванию на поворотах ЛА с высоким расположением центра тяжести при перевозке высокого пакета бревен.

С увеличением скорости прохода поворота максимальная рекуперлируемая мощность резко возрастает (рис. 5, и). Очевидно, на максимальную мощность оказывает влияние основной пик колебаний в подвеске, который формируется при максимальном переносе веса ЛА на один из бортов (рис. 5, л-н). При отрыве колес одного борта от поверхности максимальная рекуперативная мощность может достигать 40-340 кВт (рис. 5, и) при скоростях движения соответственно 70-90 км/ч. Однако для соответствующих фактических скоростей ЛА максимальная рекуперлируемая мощность не превышает 5-8 кВт. Средняя рекуперлируемая мощность также существенно увеличивается с увеличением скорости прохода поворота (рис. 5, к). Установлено, что при поворотах $N_{рс}$ составляет в пределах 1-4 кВт.

Хотя результаты получены для единичного поворота, движение ЛА по лесовозным дорогам или по второстепенным автомобильным дорогам общего рекуперлируемой мощности $N_p(t)$ при различной скорости v прохода поворота пользования сопряжено с множеством последовательных поворотов из-за поворотов дороги, объезда препятствий, взаимного перестроения участников дорожного движения. Поэтому в режиме множества сопряженных поворотов средняя рекуперлируемая мощность составит также в пределах 1-4 кВт. Это позволяет быстро зарядить ПГА и полезно использовать его далее для погрузочно-разгрузочных работ с помощью гидравлического манипулятора.

Выводы

Повышение эффективности ЛА достигается за счет следующих преимуществ, обеспечиваемых предлагаемой конструкцией рекуперативного гидропривода: он позволяет использовать в ЛА двигатель значительно меньшей мощности (минимум на 15-20 %); позволяет снизить расход топлива и токсичность выхлопных газов, за счет аккумуляирования в насосно-аккумуляторном узле рекуперативными механизмами подвески ЛА и последующего полезного использования накопленной энергии при погрузке и разгрузке сортиментов гидроманипулятором; благодаря эффективному демпфированию и амортизации, позволяет существенно повысить надежность ЛА за счет снижения динамических нагрузок на детали и узлы его трансмиссии, ходовой части и гидроманипулятора, а

также улучшить условия работы водителя-оператора; оснащение ЛА системой рекуперации позволяет при движении с частыми поворотами запасать мощность в пределах 1-7 кВт; оптимальный диаметр гидроцилиндров в подвеске, при котором рекуперирована наибольшая мощность и достаточно эффективном гаше-

нии колебаний корпуса, составляет 50-60 мм; эффективность системы рекуперации существенно возрастает с увеличением скорости движения ЛА; оснащение системой рекуперации не ухудшает устойчивость автомобиля на крутых поворотах до скорости движения 90 км/ч.

Библиографический список

1. Zhigang Fang. Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber [Text] / Zhigang Fang, Xuexun Guo, Lin Xu, Han Zhang // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2013, Article ID 943528. – P. 9.
2. Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance [Text] / Han Zhang, Huexun Guo, Lin Xu, Sanbao Hu, Zhigang Fang // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2014, Article ID 836502. – P. 11.
3. Han Zhang. Simulation and test for hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber [Text] / Zhang Han, Guo Xuexun, Xu Lin // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2) : 38-46..
4. Characteristics Analysis and Experiment of Hydraulic Interconnected Energy-regenerative Suspension [Text] / Wang Ruochen, Jiang Qiuming, Ye Qing, Chen Long, Meng Xiangpeng // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. – 2017. – 48(8). – P. 350-357.
5. Modeling and Optimization Design of Hydraulically Interconnected Energy-regenerative Suspension [Text] / Chen Long, Zhang Chenglong, Wang Ruochen, Ye Qing, Niu Limin // Nongye Jixie Xuebao. – 2017. – Vol. 48. – Iss. 1. – P. 303-308.
6. Design, modeling, and analysis of a novel hydraulic energy-regenerative shock absorber for vehicle suspension [Text] / Junyi Zou [et al.] // Hindawi Shock and Vibration, Vol. 2017, Article ID 3186584. – P. 12.
7. Simulation study on vehicle road performance with hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber [Text] / Ming Peng, Xuexun Guo, Junyi Zou, Chengcai Zhang // SAE Technical Paper 2016-01-1550, 2016.
8. Simulation research of a hydraulic interconnected suspension based on a hydraulic energy regenerative shock absorber [Text] / Junyi Zou [et al.] // SAE Technical Paper 2018-01-1582, 2018.
9. Посметьев, В. И. Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля [Электронный ресурс] / В. И. Посметьев, М. В. Драпалюк, В. А. Зеликов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 76(02).
10. Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозного автомобиля с помощью рекуперативного гидропривода [Электронный ресурс] / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 131(07).
11. Посметьев, В. И. Повышение эффективности гидропривода многофункционального автомобиля для ухода за полезащитными лесными полосами [Текст] / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, № 4 (55), 2017. – С. 140-149.
12. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 1998. – 319 с.
13. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.
14. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) [Текст] : учеб. пособие / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – М. : Metallurgy, 1978. – 288 с.
15. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст] : учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
16. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов

[Текст] : учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин – Л. : Колос, 1980. – 168 с.

17. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ [Текст] / под ред. Е. Ю. Малиновского. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.

References

1. Zhigang Fang, Xuexun Guo, Lin Xu, Han Zhang. Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber, Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2013, Article ID 943528, p. 9.
2. Han Zhang, Huexun Guo, Lin Xu, Sanbao Hu, Zhigang Fang. Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance, Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2014, Article ID 836502, p. 11.
3. Zhang Han, Guo Xuexun, Xu Lin. Simulation and test for hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2) : 38-46.
4. Wang Ruochen, Jiang Qiuming, Ye Qing, Chen Long, Meng Xiangpeng. Characteristics Analysis and Experiment of Hydraulic Interconnected Energy-regenerative Suspension, Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8) : pp. 350-357.
5. Chen Long, Zhang Chenglong, Wang Ruochen, Ye Qing, Niu Limin. Modeling and Optimization Design of Hydraulically Interconnected Energy-regenerative Suspension, Nongye Jixie Xuebao, January 25, 2017, Vol. 48, issue 1, pp. 303-308.
6. Junyi Zou, 3 Xuexun Guo, Lin Xu, Gangfeng Tan, Chengcai Zhang, Jie Zhang. Design, modeling, and analysis of a novel hydraulic energy-regenerative shock absorber for vehicle suspension, Hindawi Shock and Vibration, Volume 2017, Article ID 3186584, p. 12.
7. Ming Peng, Xuexun Guo, Junyi Zou, Chengcai Zhang. Simulation study on vehicle road performance with hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber, SAE Technical Paper 2016-01-1550, 2016.
8. Junyi Zou [et al.]. Simulation research of a hydraulic interconnected suspension based on a hydraulic energy regenerative shock absorber, SAE Technical Paper 2018-01-1582, 2018.
9. Posmetev V. I., Drapalyuk M. V., Zelikov V. A. *Ocenka effektivnosti primeneniya sistemi rekuperacii energii v podveske avtomobilya* [Evaluation of the effectiveness of the energy recovery system in the car suspension]. *Politematicheskii setevoi elektronii nauchnii jurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytechnical network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2012, no 76(02), pp. 1-15. (In Russian).
10. Posmetev V. I., Nikonov V. O. *Povishenie effektivnosti lesovoznogo avtomobilya s pomoschyu rekuperativnogo gidroprivoda* [Increasing the efficiency of a forest vehicle using a recuperative hydraulic drive]. *Politematicheskii setevoi elektronii nauchnii jurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytechnical network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2017, no 131(07), pp. 1-14. (In Russian).
11. Posmetev V. I., Nikonov V. O. *Povishenie effektivnosti gidroprivoda mnogofunkcionalnogo avtomobilya dlya uhoda za polezaschitnimi lesnimi polosami* [Improving the efficiency of the hydrodrive of a multifunctional car for the care of forest shelterbelts]. *Voronezhskii gosudarstvennii agrarnii universitet im. Imperatora Petra I* [Voronezh State Agrarian University named after. Emperor Peter I], 2017, no 4(55), pp. 140-149. (In Russian).
12. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie system* [Modeling systems]. Moscow, 1998, 319 p. (In Russian).
13. Granovskii V. A., Siraya T. N. *Metodi obrabotki eksperimentalnih danih pri izmereniyah* [Methods for processing experimental data in measurements]. Leningrad, 1990, 288 p. (In Russian).
14. Gorskii V. G., Adler Yu. P., Talalai A. M. *Planirovanie promishlennih eksperimentov (modeli dinamiki)* [Planning of industrial experiments (dynamics models)]. Moscow, 1978, 288 p. (In Russian).
15. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskii Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnih reshenii* [Planning an experiment when searching for optimal solutions]. Moscow, 1976, 279 p. (In Russian).
16. Melnikov S. V., Aleshkin V. R., Roschin P. M. *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah selskohozyaistvennih*

processov [Planning an experiment in research on agricultural processes]. Leningrad, 1980, 168 p. (In Russian).

17. . Malinovsky E. Yu. *Raschet i proektirovanie stroitelnih i dorojnih mashin na EVM* [Calculation and design of construction and road machines on a computer]. Moscow, 1980, 216 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Никонов Вадим Олегович – доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Information about authors

Posmetyev Valerii Ivanovich – professor of department of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Nikonov Vadim Olegovich – associate professor of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valerevich – Associate Professor of mechanization of forestry and design of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: victorvpo@mail.ru.

DOI: 10.12737/article_5b97a15e9393c4.46673542

УДК 51-74: 697.34:630.181:004.4

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЦ С САЖЕНЦАМИ ЦЕННЫХ ПОРОД ЛЕСА

кандидат технических наук, доцент **С. А. Сазонова**¹

кандидат технических наук, доцент **С. Д. Николенко**¹

кандидат технических наук **М. В. Манохин**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация

Рассмотрен дистанционный мониторинг технического состояния систем отопления крупных теплиц, обеспечивающий безопасный режим их функционирования и оперативность при устранении аварий систем водяного отопления в них. Выращиваемые в теплицах саженцы ценных пород леса необходимо защитить от резких перепадов температур, переохлаждения и гибели. С этой целью разработан метод статического оценивания состояния параметров режимов функционирования систем теплоснабжения, лежащий в основе задачи технической диагностики в рамках реального времени. При решении задачи статического оценивания как задачи обратного анализа применялся метод взвешенных наименьших квадратов на основе предположения о нормальном законе распределения. Изложены положения, на которых основан предлагаемый метод. В основе решения задачи лежит функциональное эквивалентирование. Учтена неизотермичность течения среды при анализе потокораспределения. В задаче принималась не традиционная совокупность параметров для оценивания, обеспечивающие в составе программного обеспечения бы-