

УДК 630*377.1

А. А. Ермалицкий, главный специалист
(Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь)

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ
ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛЕСОПОГРУЗОЧНОЙ СИСТЕМЫ
«САМОЗАГРУЖАЮЩИЙСЯ АВТОМОБИЛЬ –
МАНИПУЛЯТОР – ПАЧКА СОРТИМЕНТОВ»**

Целью исследований являлась оценка адекватности реальному производственному процессу разработанных математических моделей по обоснованию параметров колесных лесопогрузочных машин. Экспериментальные исследования проведены в натуральных условиях функционального назначения гидроманипулятора М 75-04 в составе сортиментовоза МАЗ 6303А8 и прицепа МАЗ-83781-020. В соответствии с составленным центральным композиционным В-планом второго порядка варьируемыми параметрами являлись скорость подъема, масса груза и вылет стрелы, измеряемыми величинами – вертикальные и угловые ускорения упругих элементов системы, средствами измерений – авиационные акселерометры МП-95 и тензозвесы. Результаты эксперимента свидетельствуют, что аналитическая модель имитирует работу лесопогрузочной машины в реальных природно-производственных условиях с достаточной для инженерных расчетов.

The purpose of researches was the estimation of adequacy to actual manufacturing process of designed mathematical models on a justification of parameters of wheeled timber loaders. Experimental researches are lead in natural requirements of a functionality of the hydro manipulator of М 75-04 in a composition of log hauler MAZ-6303A8 and trailer MAZ-83781-020. According to the made central composition В-plan of the second order in varied parameters the winding speed, weight of a weight and embarkation of a deflection, measured - vertical and angular accelerations of elastic devices of system, means of measuring - aviation accelerometers of MP-95 and strain-gauge balances were. Results of experiment testify, that the analytical model imitates operation of the timber loader in actual natural - working conditions with sufficient for engineering accounts.

Введение. С целью обоснования рациональных параметров базового шасси и технологического оборудования лесопогрузочных машин ранее разработан комплекс расчетных аналитических моделей [1, 2] их рабочих процессов.

При моделировании лесопогрузочная машина представляется как динамическая система, состоящая из сосредоточенных масс, соединенных безынерционными упруго-демпфирующими связями. Основными упруго-демпфирующими элементами являются шины, подвеска мостов, аутригеры, элементы трансмиссии, технологического оборудования, предмет труда.

Необходимым критерием использования этих моделей является максимальное приближение имитируемого процесса к условиям эксплуатации машины, что требует оценки точности (адекватности) соответствующего математического описания.

Проверка модели на адекватность реальному процессу представляет собой этап, в ходе которого достигается приемлемый уровень уверенности в том, что любой вывод о поведении системы, сделанный на основе моделирования, будет правильным [3].

В качестве объекта исследования выбран сортиментовоз МАЗ 6303А8 в составе прицепа МАЗ-83781-020 и гидроманипулятора М 75-04,

выполняющий технологический процесс погрузки сортиментов.

Оценка адекватности модели реальным условиям эксплуатации машины осуществлялась путем сопоставления выходных величин, полученных по результатам прогонов на модели с исходными данными реального процесса и по результатам натуральных исследований.

Основная часть. В соответствии с выбранным объектом исследований оценке адекватности подвергнута модель «самозагружающийся автомобиль – манипулятор – пачка сортиментов» [2]. В качестве выходных параметров модели выбраны пиковые значения ускорений масс динамической системы, сосредоточенных в центре тяжести машины и в точке захвата груза. Результаты расчетно-теоретических исследований показывают, что основными факторами, существенно влияющими на величину откликов имитационной модели, являются скорость подъема $v_{п}$, масса груза $m_{гр}$ и вылет гидроманипулятора $L_{тм}$. При этом зависимость откликов от варьируемых факторов – нелинейная. С целью получения эмпирического математического описания технологического процесса такой характер взаимосвязи входных и выходных параметров обосновывает выбор факторного планирования второго порядка.

Для проведения исследований выбран центральный композиционный В-план второго порядка, диапазоны варьирования факторов в котором определены из следующих соображений.

Наибольшая и наименьшая скорости подъема груза, а также наибольшая масса груза приняты на основании результатов стендовых испытаний гидроманипулятора М 75-04 на максимальном вылете стрелового оборудования и составляют $v_{п}^{\max} = 0,6$ м/с; $v_{п}^{\min} = 0,06$ м/с; $m_{п}^{\max} = 598$ кг. Наименьшая масса груза выбрана по результатам проведенных эксплуатационно-технологических исследований и составляет 98 кг, что соответствует массе одного сортамента в захвате лесопогрузчика с диаметром 0,2 м и длиной 4 м. Диапазоны варьирования вылета стрелы установлены с градацией 3 м согласно испытаниям по определению параметров демпфирования гидроманипулятора.

В каждой из пятнадцати серий плана проводились параллельные опыты, количество которых установлено по данным предварительных экспериментов. После выполнения параллельных экспериментов проводились проверка воспроизводимости опытов, оценка значимости коэффициентов полученной модели и ее адекватности экспериментальным данным.

Для записи измеряемых параметров использовалась аппаратура в составе восьмиканального измерительного усилителя «Spider 8», тензометрических весов (рис. 1, а) и четырех авиационных вибропреобразователей акселерометров МП-95 (рис. 1, б), а также портативный переносной компьютер.

Акселерометры использовались для измерения вертикальных \ddot{Y}_1 и угловых $\ddot{\theta}$ ускорений подрессорного корпуса сортиментовоза, а также вертикальных ускорений массы стрелового оборудования гидроманипулятора \ddot{Y}_2 , приведенной к точке захвата груза.

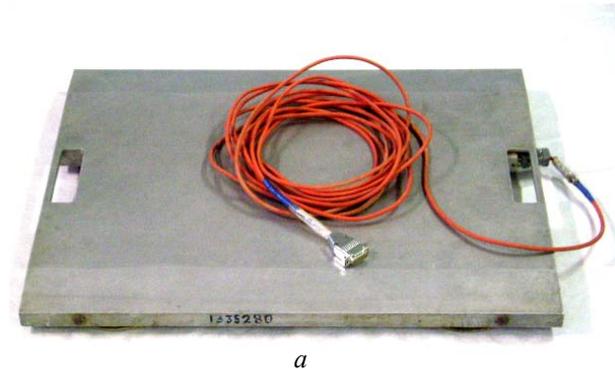
С целью адаптации вибропреобразователей МП-95 с измерительным усилителем они подключались к «Spider 8» по полумостовой схеме с подстроечным сопротивлением 100 кОм.

Градуировка акселерометров производилась с использованием жидкостного угломера путем поворота датчика последовательно на угол 90° . При этом на датчик действовало ускорение $g = 9,81$ м/с². Контроль суммарного отклонения линий прописи на диаграмме осуществлялся по величине $\pm 2g$.

Тензометрические весы применялись для определения массы сортиментов.

Отличительной особенностью тензовесов являются четыре шароподвижные опоры со степенью свободы 12 градусов. Шароподвижность компенсирует погрешности неровности основания, на которое устанавливаются весы,

что позволяет использовать их в условиях лесосеки.



а



б

Рис. 1. Элементы измерительной аппаратуры: а – тензовесы; б – датчики ускорения МП-95

Для обеспечения точности измерений тензометрических весов производилась их электрическая градуировка путем внесения паспортной градуировочной характеристики в программное обеспечение измерительного комплекса, что позволяло в процессе опытов контролировать масштаб записи.

Питание измерительного усилителя «Spider 8» осуществлялось от аккумулятора автомобиля через преобразователь-стабилизатор, питание чувствительных элементов – от измерительного преобразователя.

В процессе подготовки к проведению эксперимента была собрана измерительная цепь по функциональной схеме (рис. 2) и проверена аппаратура.

Датчики ускорений ВП₁, ВП₂ и ВП₃ устанавливались на элементах конструкции автомобиля в плоскости, проходящей через центр его тяжести. Датчик ВП₄ устанавливался на захвате гидроманипулятора.

Для регистрации и обработки данных, получаемых с измерительного прибора, применялся специальный пакет программного обеспечения «Catman express 4.5_R3». Запись измеряемых параметров производилась непосредственно на жесткий диск компьютера.

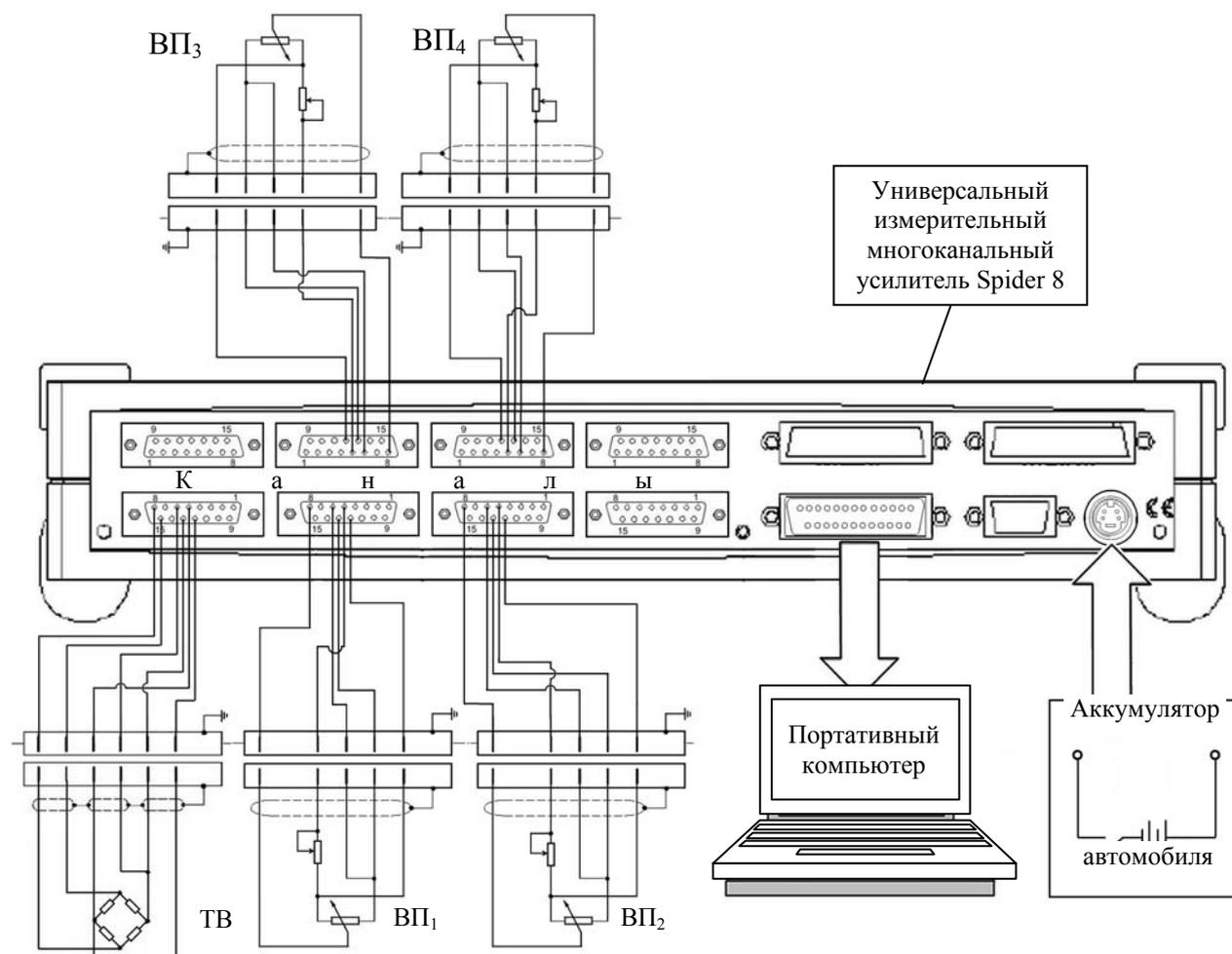


Рис. 2. Функциональная схема измерительного комплекса:
ТВ – тензovesы; ВП – датчики ускорения (вибропреобразователи МП-95)

Перед началом проведения серий опытов по составленному В-плану осуществлены необходимые подготовительные измерения. Для подбора груза, соответствующего по массе уровням варьирования, сортаменты взвешивались на тензометрических весах и маркировались. Далее устанавливалось необходимое количество оборотов двигателя для заданной скорости подъема стрелы. Время подъема фиксировалось по секундомеру СОП-2Б-3. Фиксация акселерометров на автомобиле осуществлялась с помощью специально изготовленных приспособлений.

Монтаж измерительного оборудования на объекте исследования в соответствии с функциональной схемой (рис. 2) приведен на рис. 3.

В целях обеспечения надежности выводов необходимое число реализации каждого опыта определялось по результатам контрольного эксперимента, проведенного в центре плана с помощью уравнения [4]

$$n = \left(\frac{t\sigma}{\bar{y}\varepsilon} \right)^2, \quad (1)$$

где t – показатель достоверности опыта, $t = 2,14$ (при уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 14$); σ – среднее квадратическое отклонение измеряемой величины; \bar{y} – среднее арифметическое значение измеряемой величины; ε – показатель точности исследования, $\varepsilon = 0,05$.

Результаты контрольного эксперимента показывают, что наибольшее рассеивание имеют значения ускорения массы, сосредоточенной в точке захвата груза. Поэтому расчет n выполнен для этих статистических характеристик ($\sigma_{\bar{y}_2} = 0,38 \text{ м/с}^2$, $\bar{y}_{\bar{y}_2} = 6,24 \text{ м/с}^2$). Необходимое число реализаций опыта принято равным 7.

В результате проведенной работы получена серия диаграмм, на которых зафиксированы переходные процессы объекта исследования, снятые для выбранного режима. Пример эмпирических диаграмм показан на рис. 4.

По диаграммам определялись максимальные пиковые значения амплитуд откликов эксперимента, усредненные по 7 дублированным опытам каждой серии. Далее вычислялись соответствующие им выборочные дисперсии s_i^2 .

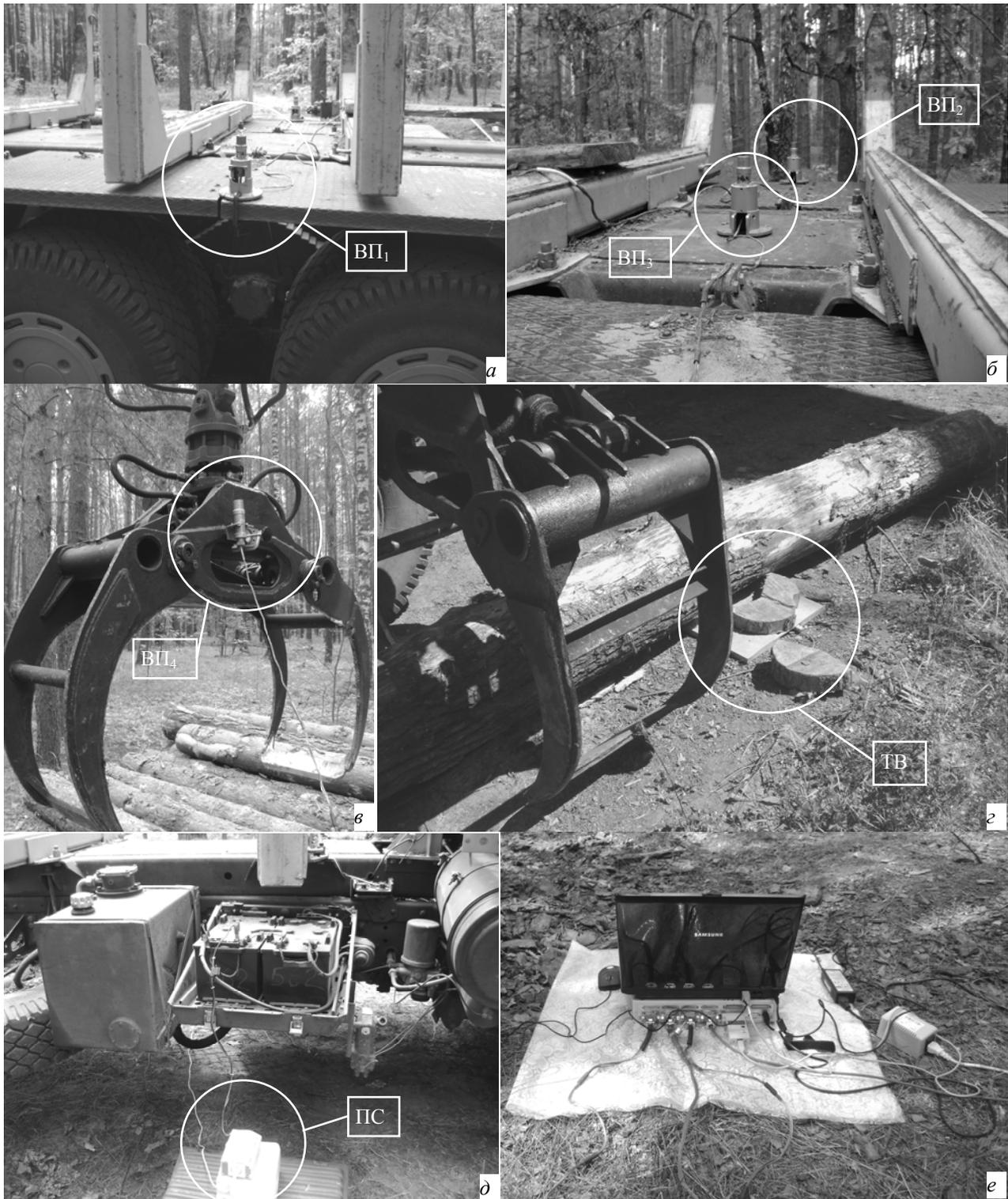


Рис. 3. Подключение измерительной аппаратуры:
а, б, в – акселерометры МП-95; *з* – тензовесы; *д* – преобразователь-стабилизатор (ПС);
е – сборка измерительной цепи по функциональной схеме

Численные значения углового ускорения центра тяжести подрессоренного корпуса автомобиля определялись по показаниям датчиков $ВП_1$ и $ВП_2$ по следующей зависимости:

$$\ddot{\theta} = \left(\left| \ddot{Y}_{(ВП_1)} \right| + \left| \ddot{Y}_{(ВП_2)} \right| \right) / 2l_d, \quad (2)$$

где l_d – расстояние от продольной оси автомобиля до точки крепления датчиков в поперечной плоскости, м.

В соответствии с теорией статистических вычислений результаты параллельных опытов подвергнуты следующей обработке.

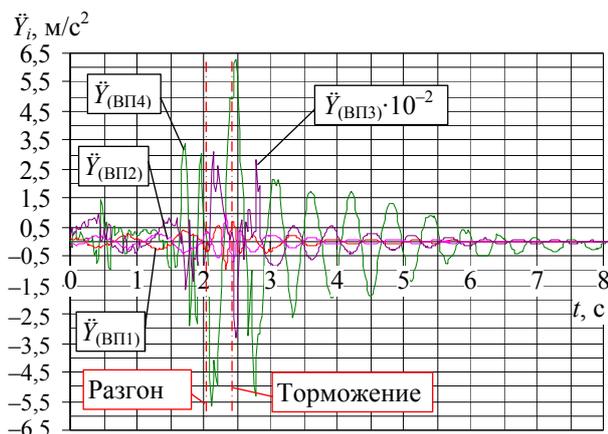


Рис. 4. Переходный процесс при подъеме груза

По G -критерию Кохрена осуществлялась проверка статистической гипотезы об однородности дисперсий параллельных опытов. Для этого вычислена величина $G_{\text{расч}}$ по формуле [4]

$$G_{\text{расч}} = \max s_i^2 / \sum_{i=1}^{15} s_i^2, \quad (3)$$

где $\max s_i^2$ — наибольшая среди всех дисперсий параллельных опытов.

Статистическая однородность параллельных опытов соблюдается при $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$. При уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f = n - 1$ $G_{\text{табл}} = 0,2$. Полученные значения $G_{\text{расч}} < 0,2$, что дает возможность принять гипотезу об однородности дисперсий опытов.

Это позволяет оценить дисперсию воспроизводимости по формуле [4]

$$s^2\{y\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{15} s_j^2. \quad (4)$$

Связанное с ней число степеней свободы $f_y = N(n - 1) = 15(7 - 1) = 90$.

В основе обработки результатов активного эксперимента с количественными факторами лежит регрессионный анализ. Для исследуемых зависимостей регрессионная модель записывается в виде полинома второго порядка:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (5)$$

где b_0 — свободный член; b_1, b_2, b_3 — линейные коэффициенты регрессии; b_{12}, b_{13}, b_{23} — коэффициенты регрессии прямых взаимодействий; b_{11}, b_{22}, b_{33} — коэффициенты регрессии при квадратичных членах.

Параметры уравнения регрессии и их значимость рассчитаны по основным формулам регрессионного анализа [4] с помощью стандартных программ, входящих в программное

обеспечение для графического и статистического анализа Statistika V6.

Итоговые уравнения регрессии (с учетом отброшенных незначимых коэффициентов) в натуральных обозначениях факторов для исследуемых откликов имитационного эксперимента представлены зависимостями (6)–(8).

Оценка адекватности регрессионной модели осуществлена с помощью F -критерия Фишера $F_{\text{расч}}$, равного отношению большего из численных значений дисперсий адекватности $s_{\text{ад}}^2$ и воспроизводимости $s^2\{y\}$ к меньшему [4].

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_1 = & 0,137 + 0,617v_{\text{п}} + 0,0006m_{\text{тр}} - \\ & - 0,058L_{\text{тм}} - 0,0001v_{\text{п}}m_{\text{тр}} - 0,051v_{\text{п}}L_{\text{тм}} + \\ & + 0,00001m_{\text{тр}}L_{\text{тм}} + 0,117v_{\text{п}}^2 + 0,005L_{\text{тм}}^2; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_2 = & -3,137 + 24,226v_{\text{п}} + 0,005m_{\text{тр}} + \\ & + 0,592L_{\text{тм}} - 1,827v_{\text{п}}L_{\text{тм}}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -0,145 + 2,581v_{\text{п}} + 0,0004m_{\text{тр}} - \\ & - 0,046L_{\text{тм}} - 0,002v_{\text{п}}m_{\text{тр}} - 0,079v_{\text{п}}L_{\text{тм}} + \\ & + 0,0001m_{\text{тр}}L_{\text{тм}} - 2,168v_{\text{п}}^2 + 0,007L_{\text{тм}}^2. \quad (8) \end{aligned}$$

При равномерном дублировании опытов

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{n}{f_{\text{ад}}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 = \frac{n}{N - B} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2, \quad (9)$$

где $f_{\text{ад}}$ — число степеней свободы дисперсии адекватности, $f_{\text{ад}} = N - B$; B — число коэффициентов регрессии оцениваемого уравнения; \bar{y}_j — среднее значение результатов эксперимента в j -й серии дублированных опытов $j = 1, 2, \dots, N$; \hat{y}_j — значение выходной величины, рассчитанное по уравнению регрессии для j -го основного опыта.

Для проверки однородности дисперсий адекватности и воспроизводимости определено табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}}$ при уровне значимости $q = 0,05$ для соответствующих им чисел степеней свободы $f_{\text{ад}}$ и f_y . Гипотеза об адекватности модели считается справедливой, если выполняется условие $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$.

Оценка однородности дисперсий $s_{\text{ад}}^2$ и $s^2\{y\}$ свидетельствует о возможности принятия гипотезы об адекватности регрессионных зависимостей для каждой выходной величины.

Адекватность полученных эмпирических моделей позволяет использовать их для оценки точности описания реального производственного процесса разработанными ранее аналитическими моделями по обоснованию параметров колесных лесопогрузочных машин.

С этой целью проведено сравнительное расчетное исследование характера изменения и величины выходных параметров $\ddot{Y}_1, \ddot{Y}_2, \ddot{\theta}$, вычисленных по аналитической модели «самозагружающийся

автомобиль – манипулятор – пачка сортиментов» [2] и по статистическим зависимостям (6)–(8).

Оценка точности разработанной модели выполнена в программном пакете Statistika V6. Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей на рис. 5.

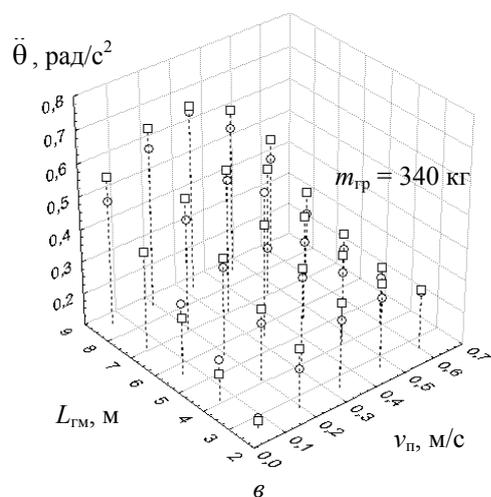
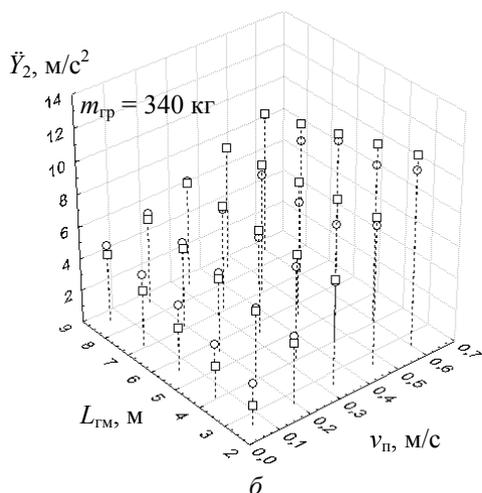
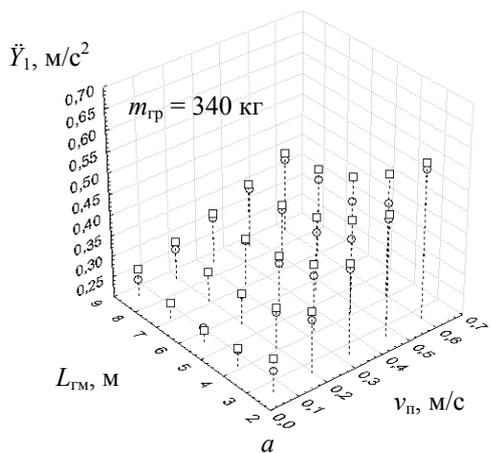


Рис. 5. Сравнение выходных параметров теоретической модели с данными результатов натурных исследований: а, б, в – теоретические (○) и экспериментальные (□) значения откликов

Результаты регрессионного анализа свидетельствуют, что из варьируемых параметров наиболее значимыми являются скорость подъема груза $v_{п}$ и вылет гидроманипулятора L_{TM} . Это обуславливает их выбор в качестве варьируемых параметров при оценке точности математической модели. Варьирование $v_{п}$ и L_{TM} осуществлялось в диапазоне, соответствующий поставленному эксперименту ($0,06 \leq v_{п} \leq 0,6$; $2,6 \leq L_{TM} \leq 8,6$). Величина массы груза зафиксирована на основном уровне $m_{гр} = 348$ кг.

Анализ отклонений величин откликов, вычисленных по теоретическим и экспериментальным зависимостям, показывает, что разработанная математическая модель учитывает основные закономерности, качественные и количественные показатели динамических процессов. Максимальное расхождение пиковых значений ускорений масс динамической системы в выбранных диапазонах варьирования влияющих факторов составляет: $\ddot{Y}_1 - 5,94\%$, $\ddot{Y}_2 - 7,82\%$, $\theta - 9,86\%$.

Заключение. Уровень несоответствия теоретических и экспериментальных значений свидетельствует, что разработанная аналитическая модель [2] имитирует работу лесопогрузочной машины в реальных природно-производственных условиях с достаточной для инженерных расчетов точностью и может быть рекомендована для использования при проектировании подобной техники.

Методика проведения настоящих эмпирических исследований может являться основой разработки методик экспериментальных оценок точности динамических моделей работы лесозаготовительных гидроманипуляторных машин.

Литература

1. Ермалицкий, А. А. Обоснование расчетных моделей колесных гидроманипуляторных лесопогрузчиков / А. А. Ермалицкий, Д. В. Клоков // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2005. – Вып. XIII. – С. 122–126.
2. Ермалицкий, А. А. Оценка динамических параметров лесотранспортной системы при выполнении погрузочно-разгрузочных работ / А. А. Ермалицкий, Д. В. Клоков // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 63–67.
3. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем. – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
4. Пижурин, А. А. Основы научных исследований в деревообработке: учебник для вузов / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 305 с.

Поступила 01.04.2011