

УДК 630*377

С. П. Мохов, канд. техн. наук, доцент (БГТУ);
 В. В. Хайновский, канд. техн. наук, ст. преподаватель (БГТУ);
 Г. В. Мартыненко, ведущий инженер (ОАО «МАЗ»),
 С. Н. Пищов, канд. техн. наук, ассистент (БГТУ); С. А. Голякевич, магистрант (БГТУ)

ДИНАМИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ-САМОСВАЛА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 26 ТОНН В ПРОЦЕССЕ РАЗГРУЗКИ

В статье приведена математическая модель автомобиля-самосвала грузоподъемностью 26 т в процессе разгрузки, которая включает расчетную динамическую схему самосвала, математические зависимости и методы их решения. Проведена теоретическая оценка динамики процесса разгрузки автомобиля самосвала с учетом физико-механических свойств перевозимого материала и динамических параметров механизма разгрузки.

In article is organized estimation of the dynamic load element to designs and drive equipping the car of the dump truck with three axes MAZ cargo-carrying capacity 26 t with back unload for functioning in heavy road condition. The dynamic force are determined in joint of the hydraulic cylinder and cargo platform.

Введение. На ОАО «МАЗ» в настоящее время разрабатывается два опытных экземпляра трехосных автомобиля-самосвала увеличенной грузоподъемности с задней разгрузкой для работы в тяжелых дорожных условиях. В рамках НИР с участием сотрудников БГТУ проводится работа по созданию и испытаниям данного вида дорожно-строительной техники.

1. Разработка динамической расчетной модели автомобиля самосвала в процессе разгрузки. Для определения динамических уси-

лий в узлах грузовой платформы, ее привода и шасси самосвала при выполнении разгрузочных операций, на основании анализа кинематики движения звеньев механизма подъема кузова самосвала, разработана соответствующая математическая модель процесса разгрузки самосвала. Математическая модель включает расчетную динамическую схему самосвала, математические зависимости и методы их решения.

Расчетная динамическая схема самосвального оборудования представлена на рис. 1.

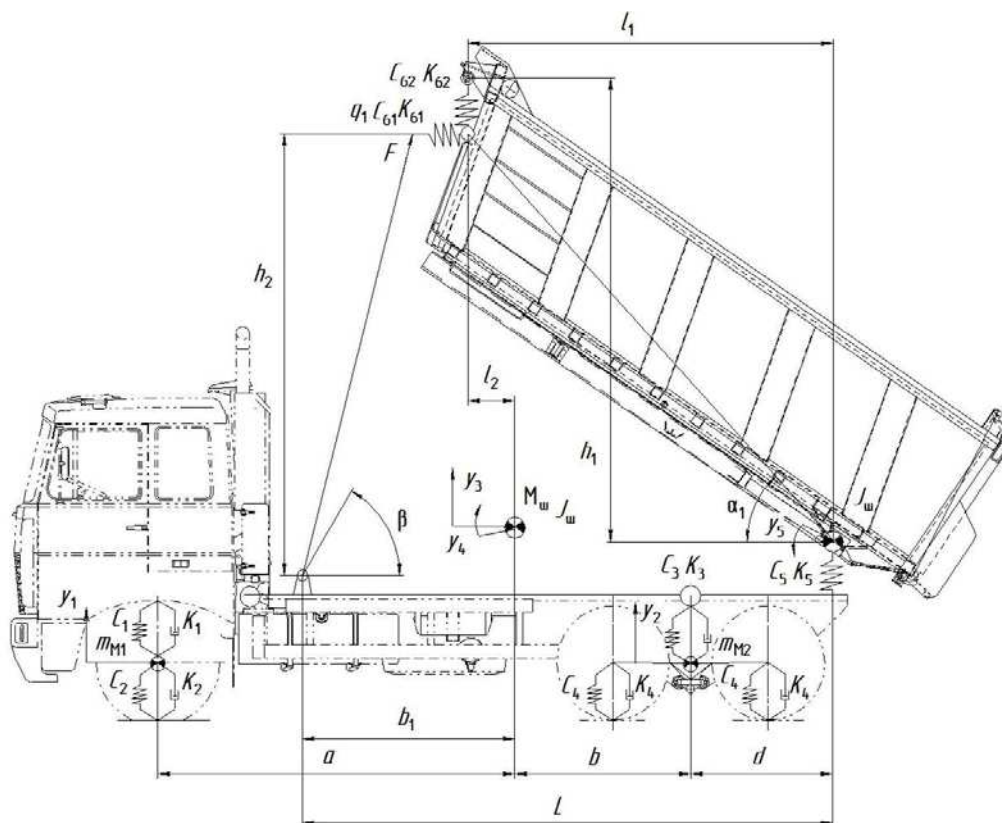


Рис. 1. Расчетная динамическая схема для определения динамических усилий грузовой платформы и шасси самосвала при выполнении разгрузочных операций

Схема имеет пять степеней свободы, описывающих колебания в продольной вертикальной плоскости. Положение проектируемого самосвала определяется следующими обобщенными координатами: вертикальным и угловым перемещениями центра тяжести самосвала – y_3 , y_4 соответственно; вертикальными перемещениями центров тяжести неподрессоренных масс передней и задней осей y_1 , y_2 ; углом подъема кузова при разгрузке – y_5 .

Следует отметить, что при разгрузке грузовой платформы момент инерции сыпучего груза является переменным параметром, зависящим от физико-механических свойств груза (в частности, угла естественного откоса), а также угла поворота грузовой платформы. Для определения момента инерции в любое время разгрузки разработана математическая модель для определения данного показателя, которая включает расчетную схему массива грунта, математические зависимости, описывающие процесс и методы их решения. Расчетная схема массива грунта, расположенного в грузовой платформе автомобиля-самосвала, представлена на рис. 2.

$$\begin{aligned} m_{m1}\ddot{y}_1 - c_1(y_3 + ay_4 - y_1) - \\ - k_1(\dot{y}_3 + a\dot{y}_4 - \dot{y}_1) + c_2y_1 + k_2\dot{y}_1 = 0; \\ m_{m2}\ddot{y}_2 - c_3(y_3 - by_4 - y_2) - \\ - k_3(\dot{y}_3 - b\dot{y}_4 - \dot{y}_2) + c_4y_2 + k_4\dot{y}_2 = 0; \\ M_{m3}\ddot{y}_3 + c_1(y_3 + ay_4 - y_1) + k_1(\dot{y}_3 + a\dot{y}_4 - \dot{y}_1) + \\ + c_3(y_3 - by_4 - y_2) + k_3(\dot{y}_3 - b\dot{y}_4 - \dot{y}_2) - \\ - c_5(y_4(b+d) - y_3) - k_5(\dot{y}_4(b+d) - \dot{y}_3) - \\ - c_{62}(-y_5l_1 - y_3 - y_4l_2) - \\ - k_{62}(-\dot{y}_5l_1 - \dot{y}_3 - \dot{y}_4l_2) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_m\ddot{y}_4 + c_1a(y_3 + ay_4 - y_1) + k_1a(\dot{y}_3 + a\dot{y}_4 - \dot{y}_1) + \\ + bc_3(y_3 - by_4 - y_2) + bk_3(\dot{y}_3 - b\dot{y}_4 - \dot{y}_2) + \\ + (b+d)c_5(y_4(b+d) - y_3) + (b+d)k_5 \times \\ \times (\dot{y}_4(b+d) - \dot{y}_3) - h_2c_{61}(-y_5h_1 - y_4h_2) - h_2k_{61} \times \\ \times (-\dot{y}_5h_1 - \dot{y}_4h_2) - c_{62}l_2(-y_5l_1 - y_3 - y_4l_2) - \\ - k_{62}l_2(-\dot{y}_5l_1 - \dot{y}_3 - \dot{y}_4l_2) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_k\ddot{y}_5 - c_{61}h_1(-y_5h_1 - y_4h_2) - \\ - k_{61}h_1(-\dot{y}_5h_1 - \dot{y}_4h_2) - c_{62}l_1(-y_5l_1 - \\ - y_3 - y_4l_2) - k_{62}l_1(-\dot{y}_5l_1 - \dot{y}_3 - \dot{y}_4l_2) = 0. \end{aligned}$$

Выражение для определения момента инерции объема груза, расположенного в кузове самосвала относительно оси OZ, имеет следующий вид:

$$I_i = \iiint r^2 dm = \rho \iiint r^2 dV = \rho \iiint (x^2 + y^2) dx dy dz,$$

где ρ – плотность песка, кг/м³; r – расстояние элементарной массы dm до оси вращения.

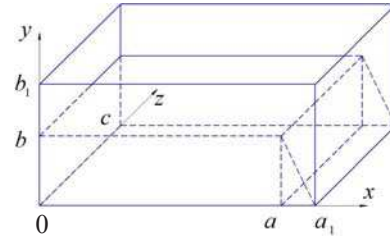


Рис. 2. Расчетная схема для определения момента инерции грунта, расположенного в кузове самосвала

Разбиваем этот интеграл на два простых для удобства интегрирования:

$$I_n = I_1 + I_2, \quad (2)$$

где I_1 – момент инерции участка сыпучего груза; расположенного в виде параллелепипеда; I_2 – момент инерции участка груза, расположенного в виде трапеции.

$$\begin{aligned} I_1 &= \rho \int_0^a dx \int_0^b dy \int_0^c (x^2 + y^2) dz = \\ &= \rho \int_0^a dx \int_0^b (x^2 z + y^2 z) \Big|_0^c dy = \\ &= \rho \int_0^a dx \int_0^b (x^2 c + y^2 c) dy = \\ &= \rho \int_0^a (x^2 cy + \frac{y^3}{3} c) \Big|_0^b dx = \rho \int_0^a (x^2 cb + \frac{b^3}{3} c) dx = \\ &= \rho (\frac{x^3}{3} cb + \frac{b^3}{3} cx) \Big|_0^a = \rho (\frac{a^3 cb}{3} + \frac{acb^3}{3}); \\ I_2 &= \int_0^a dx \int_0^{kx+d} (x^2 c + y^2 c) dy = \\ &= \int_0^a (x^2 cy + \frac{y^3}{3} c) dx \Big|_0^{kx+d} = \int_0^a (x^2 c(kx+d) + \\ &+ \frac{(kx+d)^3}{3} c) dx = \\ &= \rho (kc \frac{x^4}{4} + cd \frac{x^3}{3} + \frac{c}{3} \frac{(kx+d)^4}{4k}) \Big|_0^a = \\ &= \rho (kc \frac{a^4}{4} + cd \frac{a^3}{3} + \frac{c(ka+d)^4}{12k}), \end{aligned}$$

где $k = -\frac{b}{a_1 - a}$.

Момент инерции кузова самосвала определяется по формуле

$$\begin{aligned} I_{\varepsilon} &= 2\rho_1 \int_0^a dx \int_0^{b_1} (x^2 + y^2) dy + \rho_1 \int_0^a dx \int_0^c x^2 dz + \\ &+ 2\rho_1 \int_0^b dy \int_0^c y^2 dz + m_1 a_1 = \frac{\rho_1}{3} (2ab_1(a^2 + b_1^2) + \\ &+ a^3 c + 2cb_1^3) + m_1 a_1^2, \end{aligned}$$

где ρ_1 – плоскостная плотность материала кузова, $\text{кг}/\text{м}^2$, m_1 – масса откидного борта, кг .

В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) численным методом, были получены массивы значений перемещений y_i и производных \dot{y}_i степеней свободы от времени t . Полученные в результате моделирования массивы используются для расчетов динамических усилий в шарнире крепления гидроцилиндра подъема кузова (1), шарнире, относительно которого происходит опрокидывание кузова (2), а также динамических усилий на мостах машины (3), (4) по следующим зависимостям:

$$R_{6д} = \sqrt{(A_1 + A_2)^2 + (A_3 + A_4)^2}, \quad (3)$$

где $A_1 = c_{61}(-y_5 h_1 - y_4 h_2)$;

$$A_2 = k_{61}(-\dot{y}_5 h_1 - \dot{y}_4 h_2);$$

$$A_3 = c_{62}(-y_5 l_1 - y_3 - y_4 l_2);$$

$$A_4 = k_{62}(-\dot{y}_5 l_1 - \dot{y}_3 - \dot{y}_4 l_2); \quad (4)$$

$$R_{5а} = c_5(y_4(b+d) - y_3) + k_5(\dot{y}_4(b+d) - \dot{y}_3);$$

$$R_{1а} = c_2 y_1 + k_4 \dot{y}_1; \quad R_{2а} = c_4 y_2 + k_4 \dot{y}_2. \quad (5)$$

2. Теоретическая оценка динамики процесса разгрузки автомобиля самосвала. Оценка общего характера динамического процесса при разгрузке кузова самосвала производилась на основе анализа кривых изменения динамических усилий в шарнирах крепления кузова и на мостах машины при различных режимах работы самосвального оборудования.

При равномерном по мере подъема грузовой платформы высыпании перевозимого груза зависимость динамических усилий на поворотных шарнирах грузовой платформы имеет следующий вид (рис. 3)

В начальный момент времени (1,5 с при указанных параметрах) усилия в шарнирах крепления гидроцилиндра и грузовой платформы возрастают до значений 142 и 166 кН соответственно. В этот период начинается подъем грузовой платформы и происходит высыпание сектора груза, соответствующего углу его естественного откоса. До времени 10 с распределение нагрузок на поворотных шарнирах имеет колебательный затухающий характер за счет быстрого перераспределения массы груза по объему платформы в начальный период его разгрузки. Затем усилия на шарнирах плавно уменьшаются до полной разгрузки кузова.

При перевозке переувлажненных сыпучих грузов часто наблюдается их частичное «слипание», что приводит к неравномерному высыпанию при разгрузке. Выгрузка, таким образом, происходит «секторами» по $5...10^\circ$, что соответствующим образом отражается на динамических усилиях в поворотных шарнирах грузовой платформы (рис. 4).

При этом угол естественного откоса переувлажненного сыпучего материала увеличивается. Сползание каждого сектора выгружаемого материала сопровождается увеличением значений рассматриваемых динамических усилий в момент отрыва соответствующего объема груза от платформы за счет ускорения этого объема при сползании.

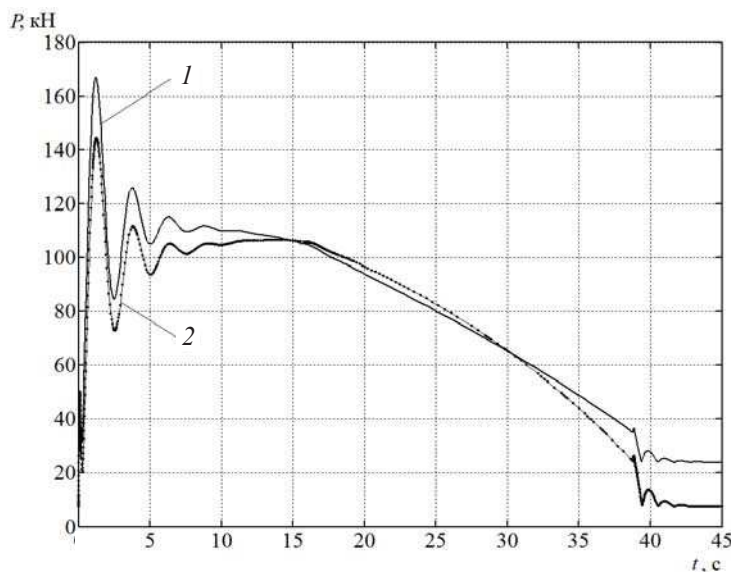


Рис. 3. Динамические усилия в шарнирах грузовой платформы (1) и крепления гидроцилиндра (2), при равномерном высыпании перевозимого материала в процессе разгрузки (угол естественного откоса 40°)

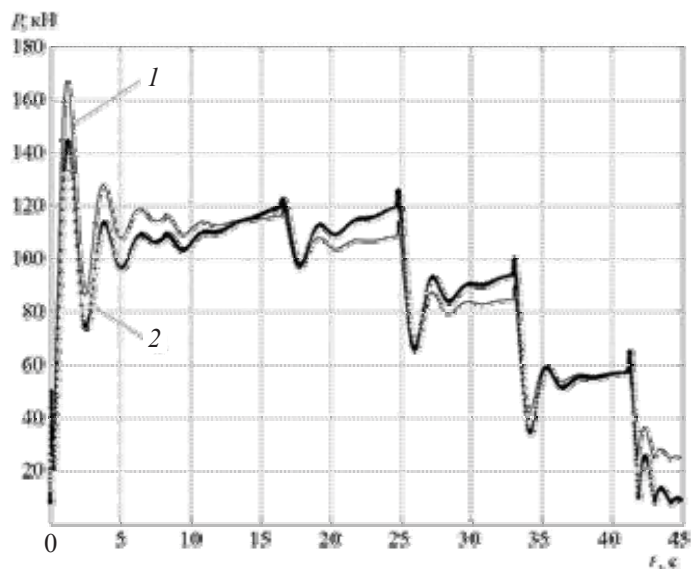


Рис. 4. Динамические усилия в шарнирах грузовой платформы (1) и крепления гидроцилиндра (2), при высыпании перевозимого материала «секторами» за счет его слипания

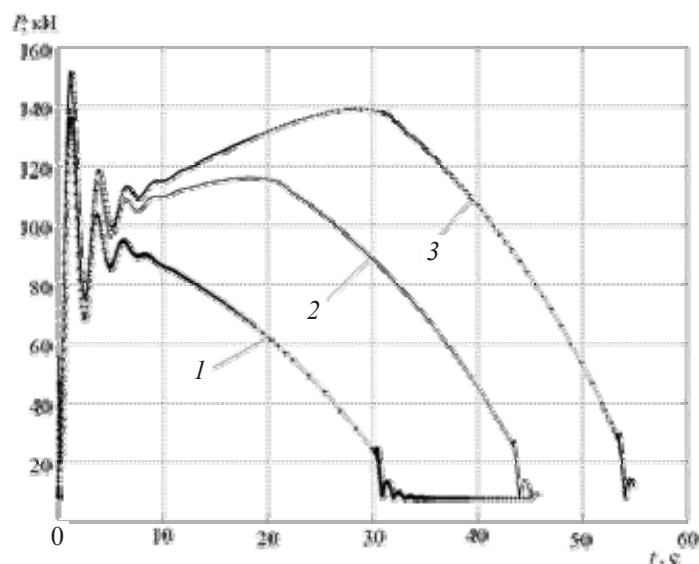


Рис. 5. Зависимости динамического усилия в шарнире крепления гидроцилиндра при разгрузке материала с углом естественного откоса 35° (1), 43° (2) и 49° (3)

Выгрузка материалов с различным углом естественного откоса отражается на кривых динамических усилий шарниров грузовой платформы. Так, на рис. 5 приведены зависимости усилий на шарнире крепления гидроцилиндра при выгрузке материалов, имеющих угол естественного откоса 35° (например, глина порошкообразная, керамзит и другие материалы в соответствии с табл. 1), 43° (песок, известь порошкообразная и др.) и 49° (цемент, цементно-песчаная смесь и др.).

При увеличении угла естественного откоса выгружаемого материала характер изменения и

величина усилия в шарнире крепления гидроцилиндра при высыпании первого сектора материала (после открытия замков заднего борта и начале подъема грузовой платформы) имеет сходные значения, а при последующем высыпании перевозимого груза максимальное усилие в шарнире крепления гидроцилиндра при разгрузке материала с углом естественного откоса 49° составляет 140 кН и значительно превышает соответствующее усилие, возникающее при разгрузке материалов с меньшим углом естественного откоса.

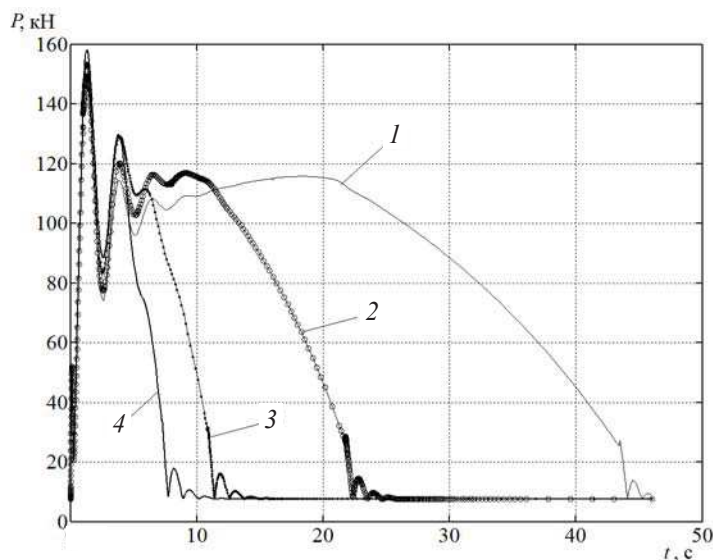


Рис. 6. Зависимости динамического усилия в шарнире крепления гидроцилиндра при скорости выдвижения гидроцилиндра: 1 – 0,05 м/с; 2 – 0,1 м/с; 3 – 0,2 м/с; 4 – 0,3 м/с

Скорость выдвижения гидроцилиндра подъема платформы оказывает значительное влияние на скорость разгрузки (рис. 6) и продолжительность воздействия нагрузки. Максимальное значение динамической нагрузки на шарнир крепления гидроцилиндра наблюдается в начальный момент подъема грузовой платформы и составляет 158 кН. Зависимость максимального усилия от скорости выдвижения гидроцилиндра изменяется незначительно и определяется производительностью гидронасоса.

Зависимости динамических усилий в поворотном шарнире грузовой платформы имеют сходный характер изменения, максимальное значение динамической нагрузки на поворотный шарнир составляет 176 кН.

Выводы. Оценка динамической нагруженности элементов конструкции и привода самосвального оборудования трехосного автомобиля-самосвала увеличенной грузоподъемности с задней разгрузкой для работы в тяжелых дорожных условиях заключается в исследовании разработанной математической модели процесса разгрузки автомобиля самосвала. Модель позволяет варьировать физико-механические свойства перевозимого материала (угол естественного откоса, влажность, масса), динамические параметры механизма разгрузки, такие, как жесткость и коэффициенты демпфирования элементов привода и опор шасси, скорость выдвижения гидроцилиндра и других параметров. Моделирование про-

цесса разгрузки автомобиля самосвала производилось с варьированием указанных выше параметров перевозимого материала и элементов привода самосвального оборудования. При этом процесс разгрузки сухого сыпучего материала происходил при равномерном его высыпании по мере подъема грузовой платформы, а при разгрузке влажного сыпучего материала происходило его частичное слипание и высыпание также частями, по объему равными соответствующим объемам треугольной призмы с углом $5...12^\circ$, что определенным образом отражалось на динамических реакциях элементов конструкции и привода самосвального оборудования.

Анализ кривых динамических усилий в шарнирах крепления гидроцилиндра опрокидывания кузова и поворотном шарнире в процессе моделирования процесса разгрузки автомобиля самосвала на всех указанных выше режимах и варьированием параметров перевозимого груза и механизма опрокидывания позволил определить значения максимальных динамических усилий в наиболее нагруженных сечениях самосвального оборудования.

Максимальное динамическое усилие, возникающее в шарнире крепления гидроцилиндра грузовой платформы, составляет 160 кН, в поворотном шарнире грузовой платформы – 176 кН, что в 1,13 и 1,22 раза больше соответствующих статических усилий.

Поступила 01.04.2010