

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА НА НАГРУЖЕННОСТЬ ПОДВЕСКИ БАЗОВОГО ШАССИ

д.т.н. Лагереv А.В., д.т.н. Лагереv И.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского
avl-bstu@yandex.ru

Рассмотрено влияние возможных положений крана-манипулятора в транспортном режиме (стрелой вперед или стрелой назад) на нагруженность передней и задней подвески базового колесного шасси (грузового автомобиля). Для этого построена математическая модель, представляющая собой уравнения движения системы сосредоточенных масс, соединенных упруго-диссипативными связями. При интегрировании уравнений движения учитывается воздействие микронеровности опорного основания и грузового момента со стороны крана-манипулятора. Деформации и усилия в подвеске оцениваются с учетом статических и динамических составляющих, вычисленных с использованием разработанной модели. Выполнены расчеты для трехосного грузового автомобиля КамАЗ 53215, оснащенного Г-образным краном-манипулятором типа Kanglim KS3105. Результаты компьютерного моделирования с помощью построенной математической модели показали, что расположение крана-манипулятора стрелой вперед приводит к значительной перегрузке передней подвески базового колесного шасси. Расположение крана-манипулятора стрелой назад приводит к разгрузке передней подвески базового шасси. Однако перегрузка задней подвески оказывается значительно ниже, так как задняя подвеска базового шасси в большей степени рассчитана на восприятие веса полезного груза. При передвижении базового грузового автомобиля с транспортным положением крана-манипулятора стрелой вперед динамическая составляющая нагрузки на переднюю подвеску выше на 10...15 %, чем при транспортном положении крана-манипулятора стрелой назад, а нагрузка на заднюю подвеску базового шасси ниже на 8...9 %. Разработанную математическую модель и расчетную методику целесообразно использовать для рационального выбора транспортной конфигурации крана-манипулятора при заданных в каждом конкретном случае характеристиках базового грузового автомобиля и загрузки транспортируемым грузом.

Ключевые слова: мобильная транспортно-технологическая машина, манипуляционная система, кран-манипулятор, транспортный режим, базовое шасси, нагруженность, подвеска.

Введение

Универсальные грузовые автомобили часто оснащают краном-манипулятором для самозагрузки [1]. Это позволяет существенно повысить функциональность грузового автомобиля и повысить его потребительские качества [2–4]. Установка кранов-манипуляторов осуществляется их производителями или специализированными организациями, а не производителями грузовых автомобилей [3]. Таким образом, параметры базового шасси входят в число исходных данных для проектирования крана-манипулятора или разработки проекта по его установке [3, 5]. С другой стороны, низкая квалификация сотрудников небольшой организации в ряде случаев не позволяет создать надежную конструкцию, отвечающую всем требованиям качества и безопасности.

Типичной ошибкой является неправильная установка тяжелого Г-образного крана-манипу-

лятора большой грузоподъемности на серийный грузовой автомобиль.

Цель исследования

Целью работы является исследование влияния транспортной конфигурации крана-манипулятора на нагруженность подвески базового шасси.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Конструкция крана-манипулятора предполагает, что в транспортном положении стрела крана-манипулятора должна быть ориентирована вперед по направлению движения автомобиля. Это создает большой дополнительный грузовой момент, который приводит к повышению нагрузки на передний мост и, соответственно, снижению нагрузки на задний мост (рис. 1). Если подвеска автомобиля не рассчи-

тана на такие нагрузки, то подвеска переднего моста может полностью выбрать свой ход, что приведет к ее быстрому отказу [6].

В этом случае более предпочтительно транспортное положение, когда стрела крана-манипулятора ориентирована назад. Однако это приводит к ограничению максимальной высоты перевозимого в кузове груза [3, 5]. Таким образом, задача разработки научно обоснованных расчетных методик и расчетных программ для ЭВМ, позволяющих конструктору при проектировании оперативно выбрать правильную транспортную конфигурацию крана-манипулятора с учетом веса и объема транспортируемого груза, является актуальной.

Построение математической модели динамики крана-манипулятора в транспортном положении при движении базового шасси

Рассмотрим расчетную схему динамики исследуемой конструкции (рис. 2). При построении математической модели сделаны следующие допущения:

- при движении стрела крана-манипулятора ориентирована строго вдоль продольной оси грузового автомобиля, а масса

системы симметрично распределена относительно этой оси, поэтому можно использовать плоскую расчетную схему;

- так как передвижение рассматриваемых мобильных транспортно-технологических машин в транспортном режиме осуществляется по подготовленным дорогам, чаще всего, по асфальтобетонным, то опорное основание можно считать недеформируемым, имеющим микронеровность [3, 7].

Статический грузовой момент, действующий на шасси со стороны крана-манипулятора, определяется следующим образом:

$$M_k = g \left[m_{z_0} l_k + \int_0^L m(z)(l_k + z) dz \right],$$

где g – ускорение свободного падения; z – координата вдоль продольной оси стрелы крана-манипулятора; L – длина стрелы в транспортном положении; $m(z)$ – функция распределения массы стрелы по ее длине; m_{z_0} – масса поворотной колонны, базовой конструкции, гидронасоса, лебедки (т.е. масса крана-манипулятора без элементов горизонтальной части стрелы и крюковой подвески).

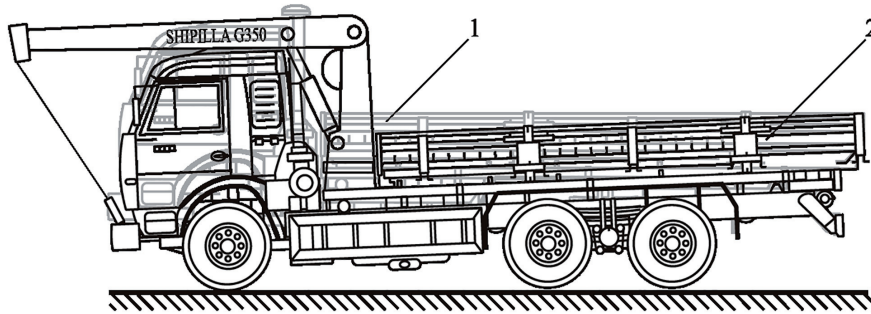


Рис. 1. Неправильная транспортная конфигурация крана-манипулятора:

1 – исходный грузовый автомобиль; 2 – грузовый автомобиль с краном-манипулятором

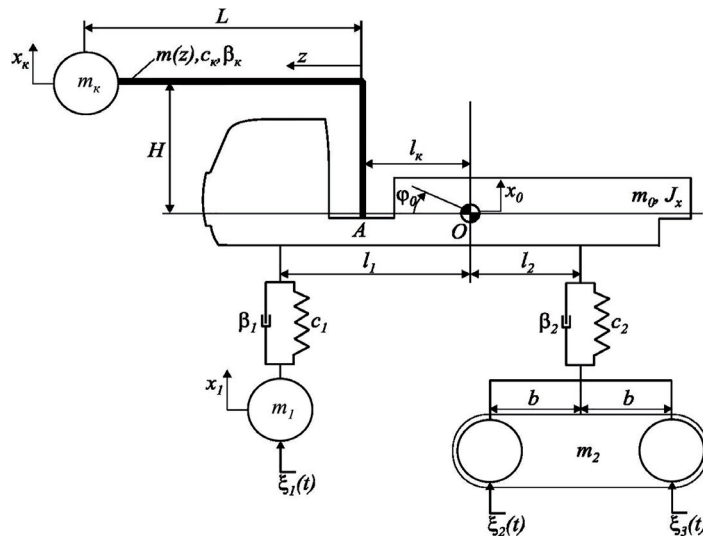


Рис. 2. Расчетная схема исследуемой машины, оборудованной краном-манипулятором

Статические значения деформаций передней и задней подвески базового шасси при воздействии статического грузового момента M_k определяется следующим образом:

- расчетный случай 1: при положении стрелы как показано на рис. 1:

$$\begin{aligned} x_{1ст} &= \frac{(m_k + m_0)gl_2 + M_k}{(l_1 + l_2)c_1}; \\ x_{2ст} &= \frac{(m_k + m_0)gl_1 - M_k}{(l_1 + l_2)c_2}; \end{aligned} \quad (1)$$

- расчетный случай 2: при стреле, развернутой назад (на 180°):

$$\begin{aligned} x_{1ст} &= \frac{(m_k + m_0)gl_2 - M_k}{(l_1 + l_2)c_1}; \\ x_{2ст} &= \frac{(m_k + m_0)gl_1 + M_k}{(l_1 + l_2)c_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_k – паспортная масса крана-манипулятора; m_0 – масса базового шасси; c_1 – жесткость передней подвески; c_2, c_3 – жесткость элементов задней подвески; l_1 – расстояние от центра тяжести базового шасси до первой оси; l_2 – расстояние от центра тяжести базового шасси до заднего двухосного моста.

Статическое значение угла перекоса базового шасси при воздействии статического грузового момента M_k определяется следующим образом:

$$\varphi_{0ст} = \arctg \left[\frac{x_{2ст} - x_{1ст}}{l_1 + l_2} \right]. \quad (3)$$

Анализ выражений (1) – (3) показывает, что в первом случае моментом M_k более нагружена передняя подвеска, а во втором – задняя подвеска, которая предназначена для восприятия основных усилий, вызванных перевозимым грузом. Однако это не означает, что транспортное положение крана-манипулятора, соответствующее первому случаю однозначно оказывает отрицательное влияние на нагруженность подвески базового шасси. Для этого необходимо исследовать динамические нагрузки в исследуемой системе с использованием следующих уравнений движения:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + F_1 + F_2 + F_k = 0; \\ J_0 \ddot{\varphi}_0 + F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_k l_k = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 - F_1 = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 - F_2 = 0; \\ m_k \ddot{x}_k - F_k = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где m_0, J_0 – масса и момент инерции поддресоренной части базового шасси; m_1 – приведенная масса неподдресоренной части переднего шасси; m_2 – приведенная масса неподдресоренной части заднего шасси; m_k – приведенная к точке повеса груза масса крана-манипулятора; $x_0, \varphi_0, x_1, x_2, x_k$ – обобщенные координаты системы; l_k – расстояние от центра тяжести базового шасси до точки установки крана-манипулятора; F_1, F_2, F_k – действующие в системе динамические усилия: в передней подвеске, в задней подвеске, в кране-манипуляторе соответственно.

Усилия в элементах исследуемой системы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1 &= c_1 (x_0 - l_1 \sin \varphi_0 - x_1 - \xi_1) + \\ &+ \beta_1 (\dot{x}_0 - l_1 \cos \varphi_0 - \dot{x}_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= c_2 (x_0 + l_2 \sin \varphi_0 - x_2 - 0,5(\xi_2 + \xi_3)) + \\ &+ \beta_2 (\dot{x}_0 + l_2 \cos \varphi_0 - \dot{x}_2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_k &= c_k (x_0 - l_k \sin \varphi_0 - x_k - \xi_1) + \\ &+ \beta_k (\dot{x}_0 - l_k \cos \varphi_0 - \dot{x}_k), \end{aligned}$$

где c_1, c_2 – коэффициенты жесткости передней и задней подвесок; β_1, β_2 – коэффициенты диссипации передней и задней подвесок; c_k, β_k – коэффициенты жесткости и диссипации металлоконструкции крана-манипулятора; ξ_i – координаты микронеровности опорной поверхности ($i = 1, 2, 3$).

Начальные условия в момент модельного времени $t = 0$ с для интегрирования системы уравнений (4) – нулевые, кроме следующих:

$$\begin{aligned} x_1(t=0) &= x_{1ст}; \\ x_2(t=0) &= x_{2ст}; \\ \varphi(t=0) &= \varphi_{0ст}. \end{aligned}$$

Микронеровность опорной поверхности моделируются с применением известного алгоритма [5]. При моделировании используется одна реализация микронеровности для всех осей базового шасси. Для определения нужных точек реализации в произвольный момент времени t^* используются следующие выражения:

$$\begin{aligned} \xi_2(t^*) &= \xi_1(t^* - \Delta 1); \\ \xi_3(t^*) &= \xi_1(t^* - \Delta 2), \end{aligned}$$

где $\Delta 1$ и $\Delta 2$ – параметры, обозначающие время, за которое вторая и третья оси (соот-

ответственно) достигнут одной и той же точки реализации микронеровности, которую ранее прошла первая ось базового шасси.

Параметры микронеровности вычисляются следующим образом:

$$\Delta 1 = \frac{l_1 + l_2 - b}{v_0};$$

$$\Delta 2 = \frac{l_1 + l_2 + b}{v_0},$$

где b – база заднего двухосного моста базового шасси; v_0 – скорость движения базового шасси (при моделировании принимается постоянной).

Результаты компьютерного моделирования динамики крана-манипулятора в транспортном положении при движении базового шасси и их анализ

С использованием предложенной математической модели был выполнен анализ нагруженности подвески порожнего грузового автомобиля КамАЗ 53215 с тяжелым краном-манипулятором типа Kanglim KS3105. Для данной конструкции приняты расчетные параметры модели, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры подвески порожнего автомобиля

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Масса подрессоренной части базового шасси	m_0	кг	8500
Приведенная масса неподрессоренной части заднего шасси	m_1	кг	160
Приведенная к точке повеса груза масса крана-манипулятора	m_2	кг	820
Коэффициент жесткости передней подвески	c_1	кН/м	1040
Коэффициент жесткости задней подвески	c_2	кН/м	1956
Коэффициент жесткости металлоконструкции крана	c_k	кН/м	740
Коэффициент диссипации передней подвески	β_1	кН·с/м	8
Коэффициенты диссипации задней подвески	β_2	кН·с/м	8
Коэффициент диссипации металлоконструкции крана	β_k	кН·с/м	1
База заднего двухосного моста базового шасси	b	м	0,66
Расстояние от центра тяжести базового шасси до первой оси	l_1	м	2,05
Расстояние от центра тяжести базового шасси до заднего двухосного моста	l_2	м	1,935
Расстояние от центра тяжести базового шасси до точки установки крана-манипулятора	l_k	м	1,05
Длина стрелы в транспортном положении	L	м	3,5
Высота расположения стрелы над центром тяжести базового шасси	H	м	2,2
Приведенная к точке повеса груза масса крана	m_k	кг	6400
Масса крана-манипулятора без элементов горизонтальной части стрелы и крюковой подвески	m_{z0}	кг	4000
Скорость движения базового шасси	v_0	м/с	10
Тип опорной поверхности	асфальто-бетонное покрытие в хорошем состоянии		

На рис. 3 приведены результаты расчета усилий в передней и задней подвеске исследуемого грузового автомобиля.

Аналогичным образом выполнен анализ нагруженности подвески грузового автомобиля в загруженном состоянии. Для этого случая были приняты иные параметры модели, приведенные в табл. 2 (неуказанные параметры соответствуют данным табл. 1).

На рис. 4 приведены результаты расчета усилий в передней и задней подвеске исследуемого грузового автомобиля.

Выводы

Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы, приведенные ниже.

1. При передвижении базового грузового автомобиля после разворота крана-манипулятора стрелой вперед (расчетный случай 1) динамическая составляющая нагрузки на переднюю подвеску выше на 10...15%, чем при развороте крана-манипулятора стрелой назад (расчетный случай 2), в свою очередь нагрузка на заднюю подвеску ниже на 8...9%.

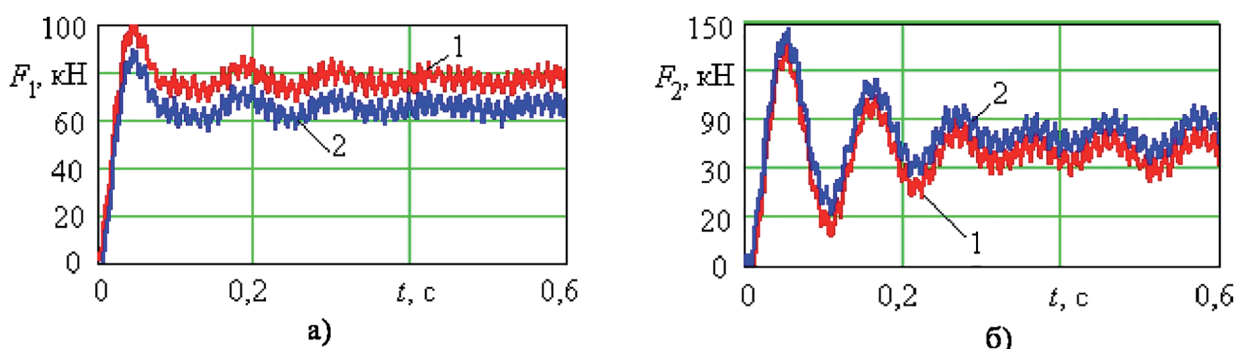


Рис. 3. Суммарные усилия в подвеске порожнего базового автомобиля, кН:

а – в передней подвеске; б – в задней подвеске; 1 – расчетный случай 1; 2 – расчетный случай 2

Таблица 2

Расчетные параметры подвески загруженного автомобиля

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Масса поддрессоренной части базового шасси	m_0	кг	19650
Расстояние от центра тяжести базового шасси до первой оси	l_1	м	2,69
Расстояние от центра тяжести базового шасси до заднего двухосного моста	l_2	м	1,295
Расстояние от центра тяжести базового шасси до точки установки крана-манипулятора	l_k	м	1,69

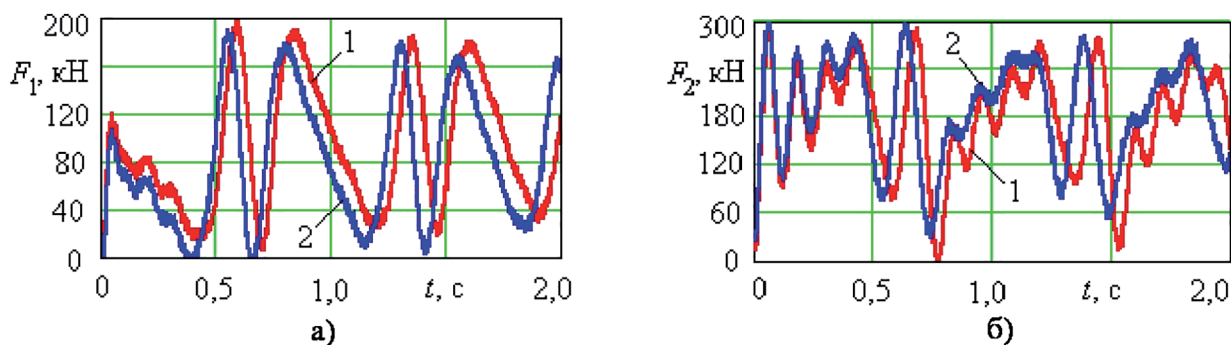


Рис. 4. Суммарные усилия в подвеске базового автомобиля в загруженном состоянии, кН:

а – в передней подвеске; б – в задней подвеске; 1 – расчетный случай 1; 2 – расчетный случай 2

2. После окончания переходного процесса в начале движения автомобиля динамический процесс изменения усилий в подвеске базового грузового автомобиля определяется колебаниями крана-манипулятора (амплитуда изменения усилия в передней подвеске составляет 14 кН, в задней – 35 кН) и воздействием микронеровности опорной поверхности (амплитуда изменения усилия в передней подвеске составляет 6 кН, в задней – 13 кН).

3. Для грузового автомобиля без крана-манипулятора статическая составляющая нагрузки на переднюю подвеску составляет 71 кН, на заднюю – 75 кН. При ориентации крана-манипулятора стрелой вперед (расчетный случай 1) эти нагрузки равны 77 и 69 кН соответственно. При ориентации крана-манипулятора стрелой назад (расчетный случай 2) – 65 и 81 кН. Таким образом, расположение крана манипулятора стрелой вперед приводит к значительной перегрузке передней подвески. Расположение крана-манипулятора стрелой назад приводит к разгрузке передней подвески. В то же время перегрузка задней подвески оказывается значительно ниже, так как она в большей степени рассчитана на восприятие веса полезного груза.

4. Высокая инерционность основного груза в полностью загруженном автомобиле меняет характер динамического процесса: колебания крана-манипулятора уже не оказывают существенного влияния на величины действующих в подвеске усилий. Однако установленные выше общие закономерности влияния различных транспортных положений крана-манипулятора на нагруженность подвески остаются в силе.

Заключение

Разработанная математическая модель и расчетная методика должны применяться для рационального выбора транспортной конфигурации крана-манипулятора при заданных в каждом конкретном случае характеристиках базового грузового автомобиля и различных значениях загрузки транспортируемым грузом.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10274)

Литература

1. Тарукин Е.М. Обзор грузовых автомобилей // Вестник НГИЭИ. 2013. № 2. С. 66–84.
2. Бандурин Р.А. Рынок кранов-манипуляторов в России // Проблемы современной экономики. 2015. № 26. С. 138–142.

3. Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с.
4. Лагерев И.А. Сравнительный анализ гидравлических кранов-манипуляторов транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2016. № 3. С. 16–49.
5. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов. Брянск: Изд-во БГТУ, 2012. 196 с.
6. ООО «Уралспецтранс». Режим доступа: <http://www.uralst.ru>. (Дата обращения 02.10.2017 г.).
7. Лагерев А.В., Мильто А.А., Лагерев И.А. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин. Брянск: РИО БГУ, 2015. 186 с.

References

1. Tarukin E.M. Review of trucks. *Vestnik NGIEI*. 2013. No 2, pp. 66–84 (in Russ.).
2. Bandurin R.A. Market of cranes-manipulators in Russia. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2015. No 26, pp. 138–142 (in Russ.).
3. Lagerev I.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobil'nykh mnogotsel'evykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of working processes of manipulating systems of mobile multipurpose transport-technological machines and complexes]. Bryansk: RIO BGU Publ., 2016. 371 p.
4. Lagerev I.A. Comparative analysis of hydraulic cranes-manipulators of transport-technological machines and hydraulic manipulators of industrial robots. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No 3, pp. 16–49 (in Russ.).
5. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Dinamika trekhzvennykh gidravlicheskiy kranov-manipulyatorov* [Dynamics of three-link hydraulic cranes-manipulators]. Bryansk: Izd-vo BGTU Publ., 2012. 196 p.
6. ООО «Uralspetstrans». URL: <http://www.uralst.ru>. (accessed 02.10.2017 g.).
7. Lagerev A.V., Mil'to A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskiy kranomanipulyatornykh ustanovok mobil'nykh mashin* [Dynamics-strength analysis of hydraulic crane-manipulator installations of mobile machines]. Bryansk: RIO BGU Publ., 2015. 186 p.

A CRANE-MANIPULATOR TRANSFER POSITION IMPACT ON A CHASSIS LOADINGS OF A BASE VEHICLE

Dr. Eng. **A.V. Lagerev**, Dr. Eng. **I.A. Lagerev**

Academician I. G. Petrovskii Bryansk State University, Bryansk, Russia,
avl-bstu@yandex.ru

In the article it was analyzed the influence of the configuration of the crane in transport mode on the loading of the suspension base chassis (truck). To do this a mathematical model was developed to represent motion equations of the system of lumped masses connected by elastic-dissipative ties. Integration of the motion equations takes into account the influence of the surface roughness of the support base and the load moment of the crane-manipulator. Deformation and efforts in the suspension are evaluated based on the static and dynamic components, calculated using the developed model. Calculations are made for a three-axle truck KAMAZ 53215, equipped with a Kanglim KS3105 crane. The results of computer simulation using mathematical models have shown that the location of the crane boom forward leads to a significant overload of the front suspension of the base chassis. The location of the crane boom backwards leads to unloading the front suspension of the base chassis. However, overloading of the rear suspension is much lower, as the rear suspension of the vehicle are mostly oriented on the perception of the weight of the payload. When moving the base truck with the transport position of the crane boom forward dynamic component of the load on the front suspension is higher by 10...15% higher than in the transport position of the crane boom backwards, and the load on the rear base of the chassis is lower by 8...9 %. The developed mathematical model and calculation methodology should be used for the rational choice of the transport configuration of the crane with specific given characteristics of the basic truck and cargo load.

Keywords: mobile transport and technological machine, handling system, crane-manipulator, transfer position, base vehicle, loadings, chassis.