

ТРАНСПОРТ

УДК 621.87:658.512.011.56

Е. И. Берестов, д-р техн. наук, И. В. Лесковец, канд. техн. наук**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЗМЫ ВОЛОЧЕНИЯ НА ОТВАЛЕ БУЛЬДОЗЕРА**

В статье приведено обоснование необходимости разработки специализированных методов для решения задач, связанных с проектированием рабочего оборудования бульдозера с помощью ЭВМ. В разработанных методах используется имитационная модель рабочего оборудования бульдозера. Изложены новые результаты теоретических исследований в этой области. Приведен способ создания виртуальной модели рабочего оборудования бульдозера и алгоритм, позволяющий создать как виртуальную, так и графическую модели. Разработан аналитический метод построения прямолинейной и криволинейной частей отвала. Изложены методы расчетов элементов призмы волочения на различных стадиях копания. Полученные результаты в совокупности с другими исследованиями позволяют при проектировании машины проводить анализ нагрузок на рабочее оборудование с целью использования полученных результатов в проведении прочностных расчетов современными методами.

Введение

Современные требования к способам проектирования машин обуславливают необходимость разработки методик, описывающих процессы, происходящие при работе уникального оборудования, например, при резании и копании грунта рабочими органами различных типов. Эти процессы настолько специфичны и сложны, что до настоящего времени при проектировании машин конструкторы не могли их учесть. Несмотря на то, что глобальные подходы к решению разнообразных технических задач разработаны еще в 60–70-е гг. прошлого века, их практическая реализация не всегда применяется при решении конкретных задач. Так, в настоящее время проектирование рабочего оборудования бульдозера ведется в соответствии с теоретическими положениями, предложенными более 30 лет назад [1]. Однако в настоящее время разработаны методики [2], обеспечивающие проектирование рабочего оборудования землеройных машин с учетом влияния большого количества факторов, описывающих состояние рабочей среды, учитывающих влияние формы и взаимного

расположения рабочего оборудования и элементов землеройной машины. По мнению авторов, одной из причин сложившейся ситуации является высокая сложность задач, которые, кроме того, плохо поддаются формализации, следствием чего является отсутствие специализированных программных продуктов, использующих современные теоретические подходы. Сложность реализации новых теоретических подходов [2] заключается в том, что, как правило, необходимо рассматривать комплекс явлений и процессов с учетом возможности возникновения частных случаев решений, поиск которых возможен при большом объеме дополнительных исследовательских работ.

Тем не менее разработка алгоритмов и программных продуктов, обеспечивающих реализацию современных методов расчета, позволяющих проводить анализ воздействующих силовых факторов, дает проектировщику возможность применять в решении поставленных задач современное программное обеспечение, использующее методы конечных элементов и позволяющее полу-

чать оптимизированные решения.

Речь идет о проектировании рабочего оборудования бульдозера с использованием современных методов расчета, позволяющих спроектировать металлоконструкцию с учетом силовых факторов и амплитудно-частотных характеристик их воздействия на отвал и нож рабочего оборудования.

Методика построения отвала аналитическим методом

В первую очередь авторами предлагается способ построения геометрических элементов отвала аналитическим методом, в отличие от графического [1]. Схема рабочего оборудования с необходимыми для расчета параметрами представлена на рис. 1, где ε – угол установки отвала; $X_{кр}$ – расстояние от кромки ножа до точки крепления отвала на тяговой раме по оси абсцисс; $Y_{кр}$ – расстояние от кромки ножа до точки крепления отвала на тяговой раме по оси ор-

динат; γ – угол резания; α – длина прямолинейной части отвала; H – высота отвала без учета козырька; R – радиус кривизны отвала; F – точка, координаты которой задают положение центра кривизны отвала в декартовой системе координат; β_k – угол установки козырька отвала; H_k – высота козырька отвала; β – угол опрокидывания козырька отвала. Для гидроцилиндра подъема-опускания отвала: диаметр поршневой полости, диаметр штоковой полости, минимальная и максимальная длины гидроцилиндра по осям крепления к раме трактора и раме рабочего оборудования. Для толкающих брусьев длина рамы от точки крепления отвала до точки крепления на раме трактора задается размерами X_a и Y_a . Расположение точки крепления гидроцилиндра к раме трактора задается величинами $X_{гц}$ и $Y_{гц}$.

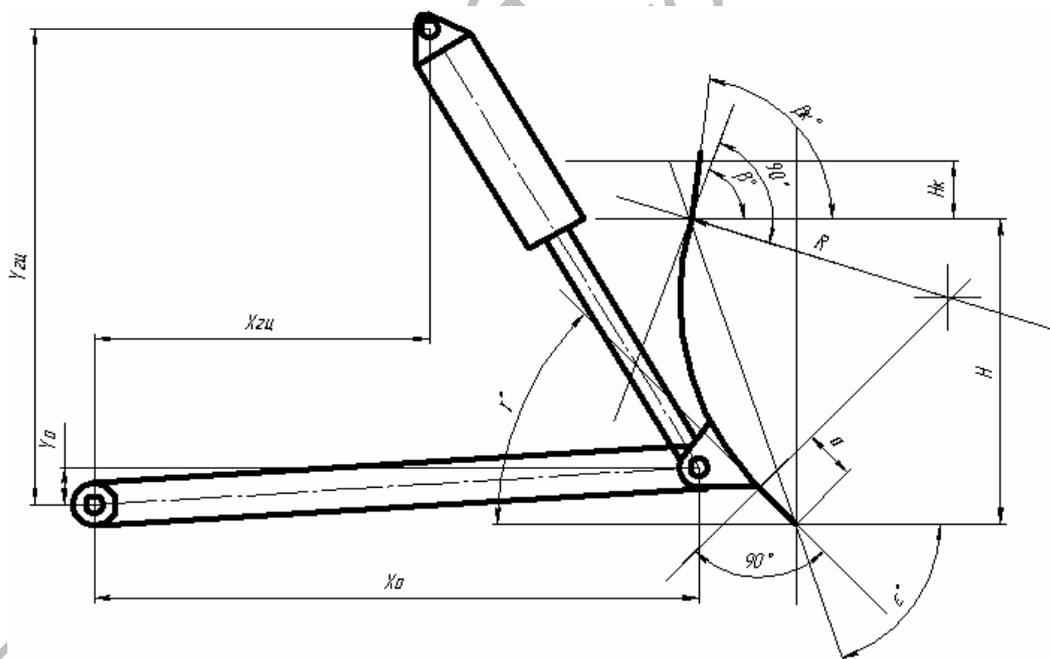


Рис. 1. Рабочее оборудование бульдозера

Предлагается алгоритм, который обеспечивает создание рабочего оборудования бульдозера в виде виртуальной модели, содержащей численные значения характер-

ных элементов, что позволяет в любой момент времени определить координаты любого элемента системы на плоскости. Структура модели реализована с исполь-

зованием технологии объектно-ориентированного программирования.

Другим отличием является предоставление пользователю программного продукта возможности задать величину радиуса кривизны отвала, что позволит сделать методы расчета более универсальными, пригодными для исследования взаимодействия отвала с легкой сыпучей средой. Учитывая, что требуется проведение расчетов, опирающихся на методы, изложенные в [2], необходимо заранее предусмотреть согласование двух различных методик.

Методика построения призмы волочения

В соответствии с методами, предлагаемыми в [2], сформированная призма волочения на отвале бульдозера имеет горизонтальный участок OM , лежащий на поверхности основания, наклонный участок MDZ , формирующийся под воздействием силы тяжести и определяющийся величиной угла естественного откоса. Часть призмы волочения $DOBZ$ представляет собой подвижный поток, перемещающийся вверх по отвалу, часть MOD представляет собой условно неподвижную призму, которая перемещается вместе с отвалом и

с его скоростью. Участок BO является площадкой большого сдвига и располагается под углом φ к горизонту; данный угол является углом большого сдвига.

Для определения параметров призмы волочения в плоской модели подвижный поток разбивается на элементы радиусами, выходящими из точки F , и окружностями с радиусами R и $R - H_i$, где H_i – толщина потока $OBZD$. Таким элементом является четырехугольник $Z_{i-1}, Z_i, D_i, D_{i-1}$ (рис. 2). Толщина элемента определяется толщиной стружки и углом большого сдвига. Линия Z_0, D_0 определяет начало разбиения подвижного потока на участки. Величина каждого участка задается пользователем, что определяет размер сегментов, отделяемых друг от друга радиусами R . Считаем, что призма волочения формируется без учета больших и малых сдвигов по мере продвижения отвала и ее объем зависит от площади, которая определяется на каждом шаге расчета как $A = \Delta l \cdot h$ (Δl – расстояние перемещения при текущем шаге расчета; h – высота стружки).

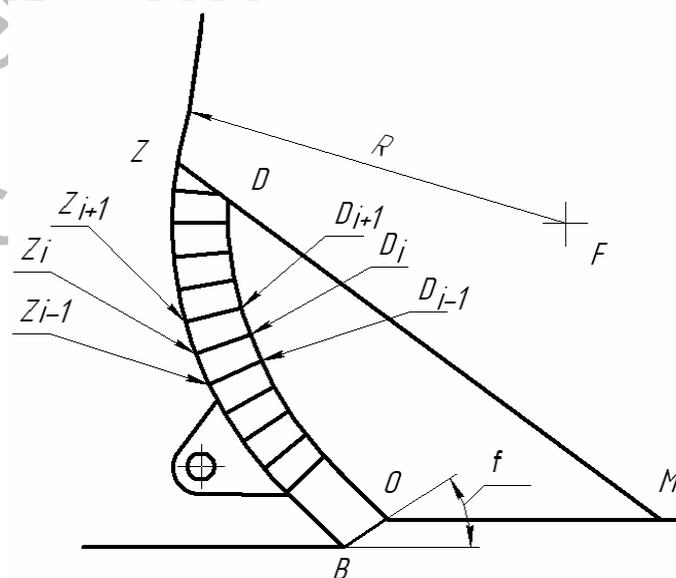


Рис. 2. Параметры призмы волочения бульдозера

Перед началом расчета геометрических параметров призмы волочения необходимо создать виртуальную модель отвала, а для удобства использования модели – графическое представление рабочего оборудования на экране компьютера. Используем следующую методику. Поручив пользователю наряду с остальными параметрами задать координаты X_{KP}, Y_{KP} , определяем расстояние от заданных координат до края ножа: $l_{KP} = \sqrt{X_{KP}^2 + Y_{KP}^2}$. Ведем построение в относительных координатах. Центром построения считаем для отвала точку с координатами X_{KP}, Y_{KP} и в начале графического построения устанавливаем курсор в эту точку. Отвал может иметь разный угол наклона в зависимости от расположения рабочего оборудования и машины в целом. В дальнейшем такой метод обеспечит преемственность метода построения отвала в комплекте с рабочим оборудованием. Для этого потребуется найти точку с координатами X_{KP}, Y_{KP} , которая соответствует точке крепления отвала на рабочем оборудовании. Определив расстояние l_{KP} , вычисляем угол между точками с координатами X_{KP}, Y_{KP} и точкой начала ножа $\varphi_H = \arctan\left(\frac{X_{KP}}{Y_{KP}}\right)$. Затем прибавляем к этому углу значение угла наклона рабочего оборудования φ_{PO} . Перемещаем курсор в точку с координатами

$$\begin{cases} X_H = X_{KP} + l_{KP} \cos(\varphi_H); \\ Y_H = Y_{KP} - l_{KP} \sin(\varphi_H). \end{cases}$$

Затем строим линию в точку с координатами

$$\begin{cases} Z_X^0 = X_H - a \cdot \cos(\gamma + \varphi_{PO}); \\ Z_Y^0 = Y_H + a \cdot \sin(\gamma + \varphi_{PO}). \end{cases}$$

От точки с этими координатами начинается построение криволинейной части отвала. Приняв, что угол разбивки криволинейной части отвала составляет один

градус, определяем длину хорды между точками на дуге: $l_X = 2\pi R / 360$. Вычисляем угол наклона первой хорды: $\varphi_X^0 = \gamma + \varphi_{PO}$. Определяем координаты следующей точки:

$$\begin{cases} Z_X^i = Z_X^{i-1} + l_X \cos(\varphi_X^0); \\ Z_Y^i = Z_Y^{i-1} + l_X \sin(\varphi_X^0). \end{cases}$$

Строим отрезок в точку с найденными координатами. Вычисляем значение угла наклона следующей хорды для следующей дуги: $\varphi_X^i = \varphi_X^{i-1} + 1$. Построение ведем в цикле дугами, начало и конец которых характеризуют будущее расположение сегментов подвижного потока. Продолжаем цикл до тех пор, пока не выполнится условие $Z_Y^i > H \cdot \cos(\varepsilon)$. Затем строим отрезок, изображающий козырек, т. е. из текущей точки проводим отрезок в точку с координатами

$$\begin{cases} K_X = Z_X^i + H_K \cos(\varphi_{PO} + \beta_K); \\ K_Y = Z_Y^i + H_K \sin(\varphi_{PO} + \beta_K). \end{cases}$$

На этом построение отвала заканчиваем. Построение линий, изображающих крепление отвала к толкающим брускам бульдозера, опускаем, т. к. способ крепления не оказывает влияния на результаты расчетов.

При построении изображения призмы волочения может возникнуть несколько разных вариантов. Расположение элементов призмы зависит от её высоты, толщины стружки, угла наклона площадки большого сдвига, параметров грунта, параметров отвала. Будем рассматривать последовательность возникновения различных вариантов в зависимости от высоты призмы волочения.

В начале набора грунта возникает вариант, когда высота призмы меньше высоты расположения точки С (см. рис. 1). В этом случае требуется вычисление координат точек Z, M, D. Производим их вычисление следующим образом:

$$\begin{cases} Z_X^0 = X_C = Y_C - H_{\text{ПР}} \sin(\gamma + \varphi_{\text{РО}}); \\ Z_Y^0 = H_{\text{ПР}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $H_{\text{ПР}}$ – высота призмы волочения;
 X_C – координата точки С по оси абсцисс;
 Y_C – координата точки С по оси ординат.

$$\begin{cases} M_X = Z_X^0 + ((Z_Y^0 - H_{\text{ГР}}) \cot \alpha(\epsilon)); \\ M_Y = H_{\text{ГР}}, \end{cases}$$

где $H_{\text{ГР}}$ – высота грунта.

$$\begin{cases} D_X^0 = Z_X^0 + \sqrt{(M_X - Z_X^0)^2 + (Z_Y^0 - M_Y^0)^2} \times \\ \times \sin \left(\arccos \left(\frac{M_X - Z_X^0}{\sqrt{(M_X - Z_X^0)^2 + (Z_Y^0 - M_Y^0)^2}} \right) \right); \\ D_Y^0 = Z_Y^0 + \sqrt{(M_X - Z_X^0)^2 + (Z_Y^0 - M_Y^0)^2} \times \\ \times \cos \left(\arccos \left(\frac{M_X - Z_X^0}{\sqrt{(M_X - Z_X^0)^2 + (Z_Y^0 - M_Y^0)^2}} \right) \right). \end{cases} \quad \begin{cases} Z_Y^i = F_Y + R \times \\ \times \sin \left(\arcsin \left(\frac{C_Y - F_Y}{\sqrt{(F_X - C_X)^2 + (F_Y - C_Y)^2}} \right) \right); \\ Z_X^i = F_X - R \times \\ \times \cos \left(\arcsin \left(\frac{C_Y - F_Y}{\sqrt{(F_X - C_X)^2 + (F_Y - C_Y)^2}} \right) \right). \end{cases}$$

Координаты точки О определяются по методике, изложенной в [2]. Далее строим многоугольник BODZ для точек D и Z с нулевыми индексами. В данном случае, как правило, $M_X < O_X$, поэтому вся призма представляет собой подвижный поток, поднимающийся вверх по отвалу, и количество участков разбиения потока равно 1.

В том случае, если высота призмы волочения больше ординаты точки С, определяем координаты точек M, Z и D по следующей методике.

На каждом шаге расчета, учитывая, что модель рабочего оборудования плоская, определяем новый объем призмы волочения как

$$V_{\text{ПР}}^i = V_{\text{ПР}}^{i-1} + F_{\text{СТ}} B_{\text{ОТВ}},$$

где $V_{\text{ПР}}^i$ – текущее значение объема призмы волочения; $V_{\text{ПР}}^{i-1}$ – значение призмы волочения на предыдущем шаге расчета; $B_{\text{ОТВ}}$ – ширина отвала; $F_{\text{СТ}}$ – площадь срезаемой стружки, $F_{\text{СТ}} = h_{\text{СТ}} \Delta l$ ($h_{\text{СТ}}$ – высота стружки; Δl – шаг перемещения отвала

на каждом шаге расчета).

Зная новый объем призмы волочения, вычисляем ее высоту. Определяя размеры сегментов, для первого участка считаем, что

$$\begin{cases} Z_X^1 = X_C; \\ Z_Y^1 = Y_C. \end{cases}$$

Затем определим координаты точки M в соответствии с уравнениями (1). Новые значения координат точки Z^i вычисляются как

Значения координат точки D_i определяются по зависимостям:

$$\begin{cases} D_Y^i = F_Y + (R - H_i) \times \\ \times \sin \left(\arcsin \left(\frac{C_Y - F_Y}{\sqrt{(F_X - C_X)^2 + (F_Y - C_Y)^2}} \right) \right); \\ D_X^i = F_X - (R - H_i) \times \\ \times \cos \left(\arcsin \left(\frac{C_Y - F_Y}{\sqrt{(F_X - C_X)^2 + (F_Y - C_Y)^2}} \right) \right). \end{cases}$$

С ростом высоты призмы волочения определяем геометрические координаты каждого выделенного сегмента. Наступает момент, когда высота призмы превышает высоту криволинейной части отвала. В этом случае прекращаем разбивку подвижного потока на сегменты и считаем верхний сегмент единым, т. к. его размеры ограничиваются предыдущим сегментом, линией козырька отвала и кривой ZM. Следует отметить, что чем больше угол внутреннего трения, тем меньше влияние верхнего уча-

стка на процессы, происходящие в призме волочения.

Для определения координат точек, характерных для верхнего участка, будем считать точку К точкой перехода криволинейной части отвала в козырек. Тогда координаты точек Z и D определяются по следующим зависимостям:

– для точки Z

$$\begin{cases} Z_x^i = K_x + (H_{пп} - K_y) \cot \alpha(\beta_k); \\ Z_y^i = H_{пп}. \end{cases}$$

Новая координата точки M

$$M_x = Z_x^i + (Z_y^i - H_{гп}) \cot \alpha(\epsilon);$$

– для точки D

$$\begin{cases} D_x^i = Z_x^i + H_i \times \\ \times \cos \left(\arccos \left(\frac{M_x - Z_x^i}{\sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (Z_y^i - M_y)^2}} \right) \right); \\ D_y^i = M_y + \left(\sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (Z_y^i - M_y)^2} - H_i \right) \times \\ \times \sin \left(\arccos \left(\frac{M_x - Z_x^i}{\sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (Z_y^i - M_y)^2}} \right) \right). \end{cases}$$

В дальнейшем расчете из-за постоянно меняющейся толщины потока H_i вследствие изменения угла наклона площадки большого сдвига координаты точек D^i верхних участков находятся одновременно на радиусе $R - H_i$ на отрезке DM. Таким образом, координаты точек D^i , находящихся на верхних участках, необходимо постоянно корректировать. Корректировку предлагается производить, сравнивая угол внутреннего трения и угол φ_D , определяемый взаимным расположением точки D^i и точки M:

$$\varphi_D = \arccos \left(\frac{Z_x^i - M_x}{\sqrt{(M_x - D_x^i)^2 + (D_y^i - M_y)^2}} \right).$$

В том случае, когда угол φ_D больше угла внутреннего трения, необходимо произвести корректировку расположения текущей точки D по зависимостям:

$$al = \sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (M_y - Z_y^i)^2};$$

$$bl = \sqrt{(F_x - M_x)^2 + (F_y - M_y)^2};$$

$$cl = \sqrt{(F_x - Z_x^i)^2 + (F_y - Z_y^i)^2};$$

$$pl = \frac{al + bl + cl}{2};$$

$$H_c = \frac{2}{cl \sqrt{pl(pl - al)(pl - bl)(pl - cl)}};$$

$$\begin{aligned} D_x^i &= M_x + H_c \times \\ &\times \cos \left(\arccos \left(\frac{Z_x^i - M_x}{\sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (M_y - Z_y^i)^2}} \right) \right); \\ D_y^i &= M_y + H_c \times \\ &\times \sin \left(\arccos \left(\frac{Z_x^i - M_x}{\sqrt{(M_x - Z_x^i)^2 + (M_y - Z_y^i)^2}} \right) \right). \end{aligned}$$

Приведенная выше методика предназначена для осуществления на ЭВМ, т. к. в процессе расчета требуется применение специальных алгоритмов для реализации циклических вычислений, а также поиска значений методом последовательных приближений с переменным шагом и изменением направления движения.

В виртуальной модели рабочего оборудования бульдозера и призмы волочения рабочее оборудование бульдозера представлено как набор библиотек, отдельных элементов ОТВАЛ, РАМА, ГИДРОЦИЛИНДР, ГРУНТ. Программное обеспечение, разработанное на основе предлагаемых методов, позволяет пользователю оперативно изменять параметры рабочего оборудования и анализировать полученные результаты, представляемые в виде текстовой либо графической информации.

Адекватность результатов расчетов проверена при помощи апробированной программы, позволяющей определять угол большого сдвига при копании грунта

отвальным рабочим органом [2]. Проверка показала хорошую сходимость. Основным отличием предлагаемой методики является использование визуального изображения моделируемых объектов на экране компьютера, что существенно облегчает работу конструктора при создании новых видов рабочего оборудования. Процесс расчета автоматизирован таким образом, что имитирует работу копания рабочим оборудованием бульдозера с выполнением операций заглабления и выглабления отвала по желанию пользователя. Специальный графический модуль программного обеспечения предлагает пользователю возможность визуального анализа информации о процессе копания с использованием элементов масштабирования. Информация о величинах усилий на отвале может представляться в текстовом и графическом виде, что позволяет оценивать динамику усилий в процессе копания. Предлагаемое программное обеспечение может быть встроено в программные продукты, позволяющие определять основные параметры гусеничной машины и, таким образом, может использоваться для определения основных параметров гусеничных машин, являющихся базой для бульдозеров [3]. Такой подход позволит на стадии проектирования выявить наиболее грубые ошибки при принятии компоновочных решений.

Выводы

Предлагаемая методика и созданный на ее основании программный продукт мо-

гут быть использованы при проектировании рабочего оборудования бульдозера с целью предварительного выбора его основных параметров. Значения усилий на рабочем оборудовании, определяемые на стадии проектирования, дают информацию для проведения оптимизационных работ с целью выбора наилучших параметров рабочего оборудования и машины в целом в зависимости от ее назначения.

Значения усилий, полученные в результате предварительных расчетов, на стадии проектирования машины могут быть использованы при проведении расчетов методом конечных элементов с целью определения наиболее нагруженных пространственных элементов конструкций. Результаты данных расчетов могут привести к снижению металлоемкости проектируемых и модернизированных машин, а также к повышению надежности и долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник конструктора дорожных машин / И. П. Бородачев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1973. – 504 с.
2. Берестов, Е. И. Научные основы моделирования системы «Грунт – рабочее оборудование землеройных машин» в режиме послышной разработки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Могилев : 1998. – 32 с.
3. Лесковец, И. В. Математическая модель гусеничного движителя СДМ / И. В. Лесковец // Вестн. МГТУ. – 2003. – № 2. – С. 83–87.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 29.10.2008

E. I. Berestov, I. V. Leskovets Design procedure of geometrical parameters of the prism of drawing on the working equipment of the bulldozer

The article proves the necessity to develop specialized methods for solving problems which are connected with design of business equipment of a bulldozer using a computer. A simulation model of a business equipment of a bulldozer is used in the developed methods. New results of theoretical research in this area are given in the paper. A way of virtual model construction of a business equipment of a bulldozer and an algorithm which allows creating both virtual and graphic models is given in the article. An analytical method of construction of rectilinear and curvilinear parts of blades has been worked out. Methods of analysis of elements of the moving prism on different digging stages are presented. The obtained results together with other research allow conducting analysis of loads on business equipment at machine design, using obtained results in strength analysis with the help of up-to-date methods.