

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА «ПРЯМАЯ ЛОПАТА»

Бахарева В.И., Касьянов П.А., Шестаков В.С.

(Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия)

В статье рассмотрена методика расчета параметров рабочего оборудования карьерных экскаваторов. Методика основана на применении моделей рабочего процесса экскавации и включает модули расчета координат точек рабочего оборудования, расчета усилий и алгоритмы их решения.

The article considers the method for calculating the parameters of working equipment of mining excavators. The technique is based on the use of models of worker processes as excavation and includes modules for calculating the coordinates of the points of the working equipment, calculation of effort and algorithms for solving them.

Одно из научных направлений кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета – совершенствование карьерных экскаваторов. Разрабатываются как новые конструктивные решения, так и методики расчета параметров, основанные на использовании имитационных моделей [1]. Модели строятся по блочному принципу. Каждый блок включает набор математических выражений и алгоритм их решения.

Блоки имитируют работу главных приводов, движение элементов рабочего оборудования, взаимодействие ковша с забоем. В модели входят выражения для определения: положения элементов рабочего оборудования в процессе рабочего цикла, усилий и моментов в элементах, загрузки приводов.

Разработанные имитационные модели могут также использоваться в цифровых системах управления. В таких системах по параметрам забоя будут определяться сигналы управления главными механизмами.

Разработка математической модели для описания процесса копания ковшом вызывает определенные сложности, связанные с разнообразием горно-технологических условий эксплуатации. Сложность математического описания увеличивается при моделировании копания в скальных породах с предварительным разрыхлением. Но и при копании в связных породах для реализации равных значений толщины стружки на уровне стояния и на уровне оси напорного вала сигнал задания для механизма напора должен быть не постоянным, а изменяться по нелинейной зависимости с учетом угла наклона рукояти и радиуса копания.

Модуль расчета координат элементов рабочего оборудования

Расчетная схема рабочего оборудования представлена на рис. 1.

Исходными данными для расчета координат служат размеры элементов рабочего оборудования (в формулах модели они обозначены для линейных размеров L с индексами по точкам на расчетной схеме, для угловых размеров присутствует знак \sphericalangle и буквенные по точкам расчетной схемы, для цилиндрических элементов присутствует d и буквенное обозначение элемента), координаты пяты стрелы (x_A, y_A), угол наклона стрелы (α_c).

Координаты точек ковша и рукояти определяем по углу наклона рукояти и передней стенки ковша к горизонту (рис. 2).

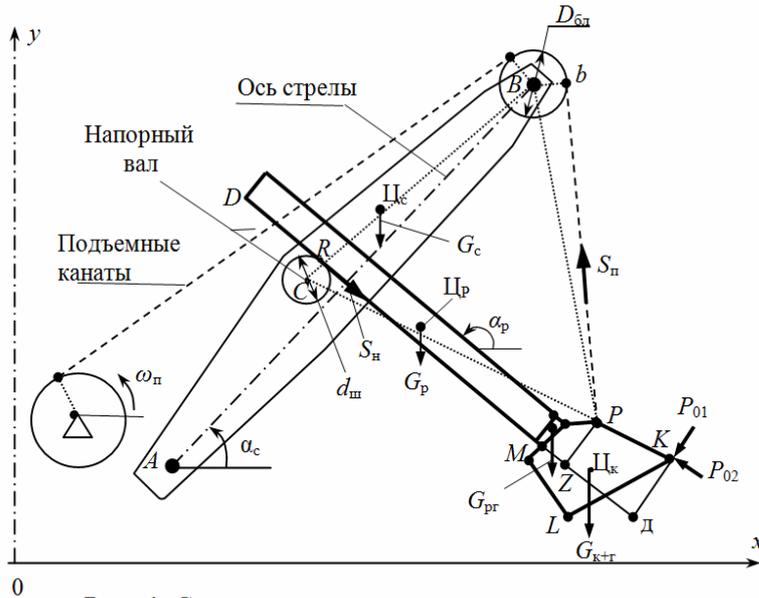


Рис. 1. Схема к составлению модели кинематического и силового анализа:

ω_n – угловая скорость барабана подъемной лебедки; Π_c, Π_p, Π_k – центр тяжести стрелы, рукояти и ковша; $d_{ш}$ – диаметр кремольерной шестерни; $D_{бл}$ – диаметр головного блока; A – оси пяты стрелы; C – ось напорного вала; B – ось головных блоков; α_c – угол наклона линии, соединяющей оси пяты стрелы и головных блоков к горизонту

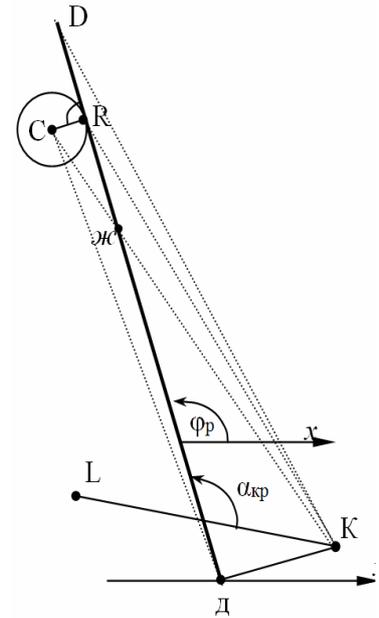


Рис. 2. Схема к определению угла наклона рукояти

При известных координатах точек K и C , линейных и угловых размеров рабочего оборудования расчет угла наклона рукояти и передней стенки ковша выполняется по следующим формулам.

Расстояние между вершиной зуба ковша и осью напорного вала

$$L_{CK} = \sqrt{(x_K - x_C)^2 + (y_K - y_C)^2}$$

Длина отрезка R_d из подобия треугольников CRJ и KDJ

$$L_{Cж} = \frac{L_{CK} d_{ш}}{d_{ш} + 2 \cdot L_{Kd}}$$

Углы расчетной схемы, длины отрезков и координаты точек:

$$\angle_{RжC} = \arcsin \frac{d_{ш}}{2L_{Cж}}; \quad \angle_{CKx} = \arctg \frac{y_C - y_K}{x_C - x_K}; \quad \angle_{RKD} = \arccos \frac{L_{KR}^2 + L_{KD}^2 - L_{DR}^2}{2 \cdot L_{KR} \cdot L_{KD}};$$

$$L_{Rж} = L_{Cж} \cos \angle_{RжC}; \quad L_{дж} = (L_{CK} - L_{Cж}) \cos \angle_{RжC}; \quad L_{Rd} = L_{Rж} + L_{дж}; \quad L_{KR} = \sqrt{L_{Rd}^2 + L_{Kd}^2};$$

$$\angle_{CKR} = \arctg \frac{0,5d_{ш}}{L_{KR}}; \quad \angle_{DKx} = \angle_{CKx} - \angle_{CKR} - \angle_{RKD}$$

$$x_D = x_K + L_{KD} \cos \angle_{DKx}; \quad y_D = y_K + L_{KD} \sin \angle_{DKx},$$

$$x_d = x_K + L_{Kd} \cos \angle_{дKx}; \quad y_d = y_K + L_{Kd} \sin \angle_{дKx}.$$

Угол наклона рукояти φ_p и днища ковша к горизонту α_k

$$\varphi_p = \arctg \frac{y_D - y_d}{x_D - x_d}; \quad \alpha_K = \angle_{KLx} = \pi/2 - \varphi_p - \angle_{LKd}.$$

Углы расчетной схемы, длины отрезков и координаты точек

$$\begin{aligned} x_L &= x_K + L_{KL} \cos \alpha_K; & y_L &= y_K + L_{KL} \sin \alpha_K; & L_{KM} &= \sqrt{L_{GM}^2 + L_{KG}^2 - 2L_{GM}L_{KG} \cos \angle_{MGK}}; \\ \angle_{LKM} &= \arccos \frac{L_{KL}^2 + L_{KM}^2 - L_{LM}^2}{2 \cdot L_{KL} \cdot L_{KM}}; & \lambda &= \alpha_K - \angle_{LKM}; & \angle_{PKx} &= 2\pi - \pi/2 - \varphi_p - \angle_{PKd}; \\ x_M &= x_K + L_{KM} \cos \lambda; & y_M &= y_K + L_{KM} \sin \lambda; \\ x_P &= x_K + L_{KP} \cos \angle_{PKx}; & y_P &= y_K + L_{KP} \sin \angle_{PKx}. \end{aligned}$$

По приведенным выражениям определяем параметры начального положения ковша, задаваемого координатами вершины зуба ковша x_K, y_K . При копании происходит изменение длины подъемных канатов и вылет рукояти.

Под вылетом рукояти на схеме понимается отрезок от точки контакта кремольерной шестерни с напорной рейкой R до точки проекции оси коромысла на линию продолжения напорной рейки (L_{RZ}). Под длиной каната в расчетной схеме понимается отрезок от точки схода подъемных канатов с головных блоков b до оси коромысла ковша P (L_{bp}). Углы, длины отрезков и координаты точек при движении ковша:

$$\begin{aligned} L_{PC} &= \sqrt{(d_{ш}/2)^2 + L_{PR}^2}; \\ \angle_{PCB} &= \arccos \frac{L_{PC}^2 + L_{BC}^2 - L_{BP}^2}{2 \cdot L_{PC} \cdot L_{BC}}; & \angle_{BCx} &= \arctg \frac{y_B - y_C}{x_B - x_C}; & \angle_{PCx} &= \angle_{PCB} - \angle_{BCx}; \\ L_{PR} &= \sqrt{L_h^2 + L_{PZ}^2}; & x_P &= x_c + L_{PC} \cos \angle_{PCx}; & y_P &= y_c - L_{PC} \sin \angle_{PCx}. \end{aligned}$$

По найденному значению координат точки P определяются координаты вершины зуба ковша x_K и y_K , а по ним координаты всех элементов рабочего оборудования и точек приложения сил тяжести элементов.

Модуль расчета усилий напорного и подъемного механизмов

Статические усилия в подъемном канате S_{ni} при черпании и транспортировании ковша определяются из уравнения моментов от сил сопротивления породы копанью P_{01} и P_{02} , веса ковша с грузом $G_{к+г}$ и веса балок рукояти G_p , веса головной отливки $G_{пр}$ относительно оси напорного вала. Значения плеч действия сил определяются по приведенным выше моделям. Балки рукояти учитываются в расчетах распределенной нагрузкой по длине рукояти, а концевая отливка – сосредоточенной силой.

Уравнение равновесия относительно оси вала (рис. 1)

$$\begin{aligned} -q_p(x_R - x_D)^2/2 + q_p(x_U - x_R)^2/2 + G_{пр} \left(\frac{x_U + x_F}{2} - x_R \right) + G_{к+г} \left(\frac{x_U + x_K}{2} - x_R \right) + \\ + P_{01} \cdot L_{CK} - S_{ni} \cdot L_{CP} \cdot \sin(\angle_{CPx} - \angle_{bPx}) = 0 \end{aligned}$$

где q_p – распределенная нагрузка рукояти $q_p = \frac{G_p}{L_{DE}}$.

Из уравнения равновесия определяется усилие в подъемном канате при копании

$$S_{ni} = \frac{P_{01} \cdot L_{CK} + G_{к+г} \left(\frac{x_U + x_K}{2} - x_R \right) + G_{пр} \left(\frac{x_U + x_F}{2} - x_R \right) + q_p(x_R - x_D)^2/2 - q_p(x_E - x_R)^2/2}{L_{CP} \cdot \sin(\angle_{CPx} - \angle_{bPx})}$$

При копании без стопорения напорное усилие в рукояти зависит от усилий копания, положения ковша и его загруженности горной массой.

Напорное усилие определяется из суммы проекции всех действующих сил на образующую зубчатой рейки или ось рукояти (рис. 1)

$$S_{н.и} = S_{п.и} \cos(\alpha_p - \angle_{bpx}) + P_{02} \cos(\angle_{CKx} - \alpha_p) - P_{01} \cdot \sin(\angle_{CKx} - \alpha_p) - G_{к+п} \sin \alpha_p - (G_p + G_{pr}) \cdot \sin \alpha_p$$

Модуль имитации работы

Для проведения кинематического и силового анализа разработан алгоритм и по нему составлена программа для ЭВМ.

В алгоритме имитационной модели обеспечено изменение начальной точки копания от минимального до максимально возможного радиуса. Шаг изменения координат траектории для связных пород определяется по известным зависимостям по условию заполнения ковша до уровня оси напорного вала [2].

Траектория копания из начальной точки формируется работой напорного и подъемного механизмов, при интегрировании скоростей этих механизмов определяется вылет рукояти $L_{н.и}$ и длина подъемных канатов от головных блоков до ковша $L_{п.и}$.

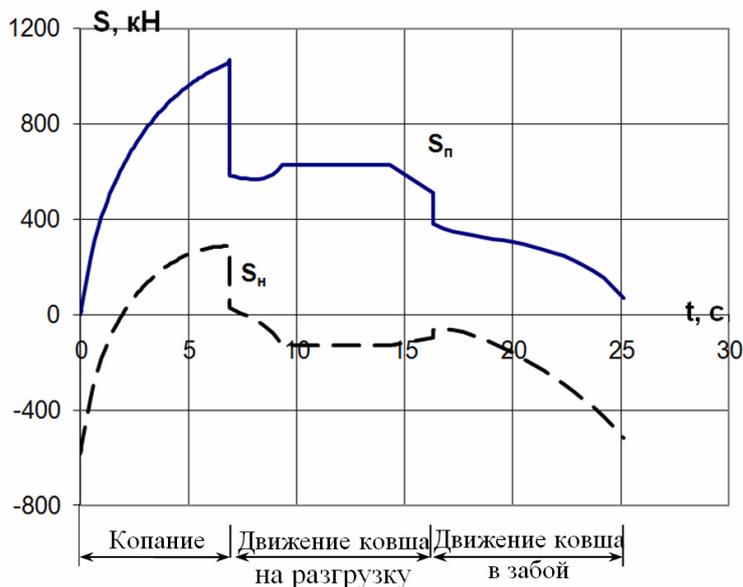


Рис. 3. Результаты расчета усилий

На рис. 3 для одной из траекторий приведены результаты расчета усилий подъема $S_{п.и}$ и напора $S_{н.и}$ при копании и транспортировании ковша.

Выводы. Разработанные модели, алгоритмы и программное обеспечение обеспечивают расчет кинематических и силовых параметров экскаваторов. Используя графики изменения усилий для специализированных пакетов можно проводить прочностные расчеты и определять долговечность узлов экскаватора.

Список литературы: 1. Хорошавин С.А., Шестаков В.С. Определение параметров экскаватора с рабочим оборудованием «прямая лопата» при эскизном проектировании // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 9. С. 30-36. 2. Ю. А. Лагунова, А.П. Комиссаров, В.С. Шестаков и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Горные машины. Т. IV-24, 2011. 496 с.