ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Н.Д. ХАРИТОНОВ, аспирант, С.Г. ГУБАНОВ, канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119991, Москва, Ленинский пр-т, 4, e-mail: cool-kolya@mail.ru

© Харитонов Н.Д, Губанов С.Г., 2021

Рассмотрен вопрос нахождения оптимального угла проникновения ковша в породу в гидравлическом экскаваторе. Исследование проведено с использованием технологии 3D-моделирования и симуляции с помощью программного обеспечения Autodesk Inventor. Для выполнения расчетов была создана модель рабочего органа экскаватора. Итоговым результатом исследования стали графические данные, на которых показано изменение угла проникновения ковша в зависимости от углов отклонения рабочей стрелы, что позволяет сделать вывод о рациональном угле отклонения, при котором возможно уменьшить рабочий цикл экскаватора. Учитывая человеческий фактор и неполную автономность рабочего цикла экскаватора, данное исследование в большей степени применимо к автоматизированной выемке грунтов.

Ключевые слова: гидравлический экскаватор, моделирование, расчет и симуляция.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-56-63

ВВЕДЕНИЕ

Экскаваторы являются одними из наиболее широко используемых выемочно-погрузочных машин. В перечень работ, в которых участвуют экскаваторы, входят выемочные работы, добыча полезных ископаемых, рытье траншей, ям, фундаментов, погрузочно-разгрузочные работы, генеральная планировка, ландшафтный дизайн, удаление кустарника с помощью гидравлического оборудования, лесохозяйственные работы, снос и многие другие.

Гидравлические экскаваторы — оборудование, традиционно используемое на выработках и выемках полезного грунта, а также строительных площадках в течение большого периода времени. Основные задачи, выполняемые при помощи экскаватора, сводятся к выемке грунта и землеройным работам. Манипулятор, рабочий инструмент экскаватора, состоит из стрелы, гидравлического оборудования и ковша. Управление оборудованием осуществляется с помощью гидравлического привода, в то время как основной двигатель, обычно дизельный, подает питание на каждый из приводов.

Процесс рытья экскаватора можно разделить на три независимые операции: проникновение в почву, отделение и вторичное отделение, причем на каждом этапе определяется сопротивляемость почв и грунтов. Движение копания и сила, с которой производится давление, определяются на разных этапах процессах выемки [1].

Гидравлический экскаватор существенно отличается от канатных экскаваторов, прежде всего, он ограничен линейным уровнем срабатывания гидравлических цилиндров. Верхний рычаг экскаватора — его стрела помогает при перемещении материала, однако их перемещение не зависит друг от друга. С использованием новых технологий и систем моделирования можно получить реалистичную модель взаимодействия и нагрузок на рабочую систему экскаватора. При этом, используя полученные

результаты, можно определить оптимальную траекторию перемещения, а также вычислить рабочие параметра стрелы экскаватора.

Целью данной статьи является рассмотрение модели стрелы экскаватора, проведение и проверка ассимиляционных нагрузок, а также определение на основе полученных данных параметров вхождения ковша, как рабочего органа экскаватора, в грунты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В схему строения гидравлического экскаватора входят приводная база и связанная с ней стрела, которая имеет насадку для земляных работ. Оператор экскаватора находится в небольшой кабине на платформе, откуда осуществляет управление платформой и рабочей стрелой. Гидравлическая система, как основная часть данного оборудования, необходима для приведения в действие рабочего органа экскаватора, а также для контроля ковша. В управлении экскаватора можно выделить следующие основные элементы [2]:

- 1. Управление движимой платформой. Система экскаватора использует дизельный двигатель, который производит большую рабочую мощность и при этом не зависит от тяжелых условий окружающей среды, таких как запыление. Двигатель приводит в движение систему перемещения экскаватора, в то время как гидравлическая система питает стрелу. Оператор управляет системой данной машины из кабины посредством системы педалей.
- 2. Управление стрелой экскаватора. Прямолинейный стержень экскаватора крепится к нижней части рамы, имеет несколько гидравлических поршней и состоит из двух движущихся частей и ковша для погрузки. Каждая секция подключена к другой части с помощью системы шарниров и поршней. Данная система необходима для выдвижения и расширения секции стрелы. Работает данная система так: первый поршень при выдвижении расширяет секцию, второй используется для увеличения площади охвата, тогда как последний поршень, присоединенный к ковшу, осуществляет перемещение ковша для упрощения выемки.
- 3. Вид движения экскаватора Для перемещения машина имеет систему, схожую с танковой: две гусеницы помогают при перемещении взад и вперед, а также при повороте экскаватора относительно своей оси. Некоторые модели имеют поворотную платформу для вращения рабочей части.

При всех преимуществах экскаваторы ограничены углом наклона и направлением стрелы [3]. Из-за этого прилагаемая ими сила не используется на 100 %. На управляемость и эффективность рабочих органов влияют многие факторы. Для улучшения параметров гидравлического экскаватора и успешного проведения анализа была создана точная модель, содержащая все описанные выше элементы перемещения. Для этого использовали программный набор Autodesk, в частности программу Inventor. Данная программа доступна для обучающихся в образовательных учреждениях и позволяет создавать объемные модели, а также проводить инженерную диагностику и симуляцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом проделанной работы стала модель стрелы с ковшом и гидроцилиндрами (рис. 1). Для облегчения моделирования и проверки полученных результатов модель была разделена на три основных части – по три степени движения на всю стрелу. На рисунке рабочие зоны стрелы выделены красными линиями.

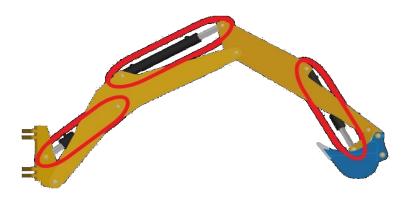


Рис. 1. Пространственная модель с выделенными рабочими зонами стрелы экскаватора

Упрощенная модель соединений в экскаваторе со всеми элементами показана на рис. 2. Введем обозначения:

точка 1 — соединение относительно первой и второй части стрелы — первый цилиндр. Принимая данную точку за начало отсчета, можно рассчитать направление для всех остальных элементов;

точка 2 – верхнее соединение относительно гидроцилиндра и середина всей системы;

точка 3 – соединение между основным выдвижным гидроцилиндром и двумя частями стрелы;

точка 4 – соединение ковша с центральной частью системы и конец стрелы.

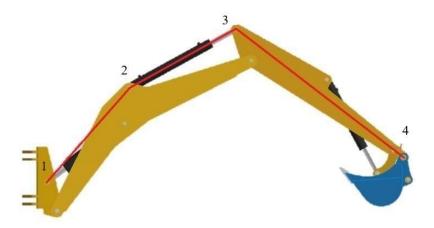


Рис. 2. Разметка упрощенной модели стрелы экскаватора

Расчет упрощенной модели. Для решения поставленных задач необходимо найти координаты каждой точки стрелы экскаватора.

Координаты точки 1-(0.0), так как она принимается за начало координат. Отсчитывая систему от основной точки, получим координаты точки 2:

$$L_1 \cdot \cos \alpha_1 = x_2$$

$$L_1 \cdot \sin \alpha_1 = y_2,$$

где L_1 – длина стрелы от точки 1 до точки 2, α_1 – угол отклонения прямой 1-2 от стрелы 1-2.

Координаты точки 3 равны:

$$x_2 + L_2 \cdot \sin \alpha_2 = x_3$$

$$y_2 + L_2 \cdot \cos \alpha_2 = y_3,$$

где L_2 – длина стрелы от точки 2 до точки 3, α_2 – угол отклонения прямой 2-3 от стрелы 2-3.

$$\alpha_2 = 180 - \alpha_1$$
.

Учитывая данное соотношение, получаем:

$$x_2 + L_2 \cdot \sin(180 - \alpha_1) = x_3,$$

 $y_2 + L_2 \cdot \cos(180 - \alpha_1) = y_3.$

Координаты точки 4 определяются относительно остальных координат, но для данного исследования их можно не находить. С помощью программного обеспечения Autodesk Inventor создадим и просчитаем модель рабочего органа экскаватора со всеми возможными степенями свободы (рис. 3). Данная модель доказывает, что выбранная методика вычисления является верной и покрывает все доступные степени свободы.

Используя программное обеспечение Autodesk Inventor, а именно систему поиска степеней свободы, можно обнаружить около 15 степеней свободы, которые нам необходимо проверить и отсортировать [4–5]. Проверяя степени свободы, мы отсортировываем те, что зависят от дополнительных зацеплений. Обобщая и сокращая некоторые из степеней свободы, приходим к упрощенному варианту. На рис. 3 отображена упрощенная система для исследования зависимостей перемещения стрелы от углов поворота каждого элемента.

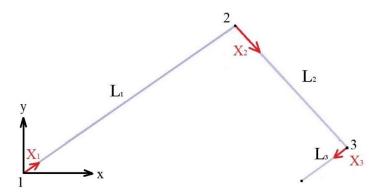


Рис. 3. Схема упрощенной модели стрелы экскаватора

Используя данные, полученные с помощью программы Inventor, можно выполнить симуляцию для проверки каждой точки на выявление погрешностей и поиска необходимых результатов.

Для запуска общей системы исследования установим ограничения в каждой точке:

точка 1 — ограничение по углу в 50° ; точка 2 — ограничение по углу в 60° ; точка 3 — ограничение по углу в 60° .

Для расчета основных параметров были проведены проверки каждого соединения с 0° до конечной точки с шагом в 30° [4].

В качестве рассматриваемых параметров возьмем радиус оборота рабочей платформы относительно оси и угол соединения. Радиус оборота необходим для расчета оптимального времени для завершения цикла погрузки и выгрузки. Угол соединения – угол между точками 3 и 4 – необходим для расчета угла проникновения ковша в породу.

Глубина проникновения ковша — это расстояние от уровня стоянки экскаватора до зубьев ковша при копании ниже уровня стоянки. Стоянка находится ниже точки 1, расположенной на рис. 2. Глубина проникновения ковша — $H_{\rm K}$. Угол проникновения $\alpha_{\rm пр}$ отображает угол между ковшом и породой и определяет усилие, которое ковш совершит на породу (рис. 4).

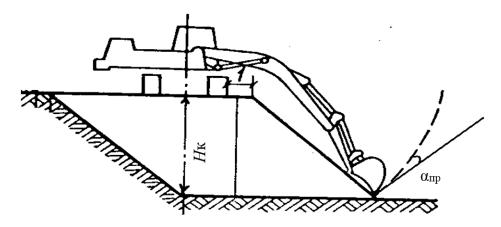


Рис. 4. Схема работы экскаватора

На основе схемы на рис. 4 проведем анализ рабочей системы. Изменяя углы поворота всех систем, находим взаимосвязи для обработки линейных параметров. На рис. 5(a), (б) представлена графическая взаимосвязь между углом отклонения каждого элемента и общим радиусом стрелы.

С помощью специальной программы при изучении необходимых степеней свободы и использовании нагрузки на данные элементы получено, что при определенных углах поворота и углах выдвижения оператор может экономить время для выполнения выемочных работ [5]. Из-за измененных углов поворота меняется и коэффициент проникновения, показывающий эффективность вхождения в породу. По графику на рис. 5(а) перемещения компонента стрелы 1-2 можно определить, какой угол поворота удобнее для перемещения между местом выемки и загружаемым средством [6]. На рис. 5(б), (в) показана зависимость между коэффициентом поворота ковша и проникновением в породу.

Исходя из анализа полученных данных, можно оптимизировать выемку грунтов, если угол входа ковша будет равен углу внутреннего трения грунтовой среды. Угол внутреннего трения — это угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы или иного сыпучего вещества с горизонтальной плоскостью. Предположив, что уровень земли всегда принимается равным нулю, можно рассчитать оптимальные линейные параметры для стрелы экскаватора, а также эффективный угол проникновения ковша в грунт. Из этого следует, что умножением угла входа или проникновения рабочего органа на эффективную проникающую способность грунта можно получить коэффициент проникновения для всех случаев длины стрелы и положения соединений.

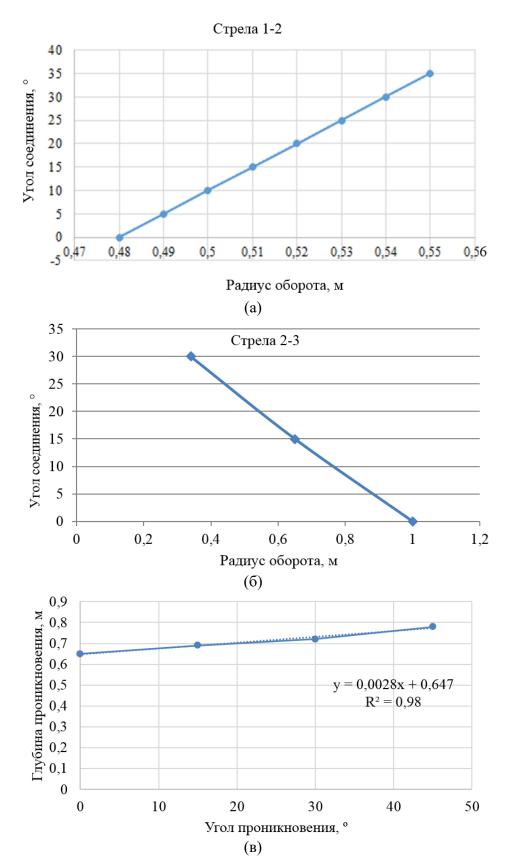


Рис. 5. Результаты теоретических исследований: зависимость угла соединения узлов стрелы от радиуса оборота от выемки (а), зависимости угла поворота стрелы от угла проникновения в породу (б) и (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при различных углах наклона стрелы существенно меняется глубина проникновения ковша в грунт. Однако из-за ограничений по виду, составу почвы, а также из-за нестабильных условий окружающей среды результаты исследований могут меняться. По результатам проведенных работ оптимальное положение ковша наблюдается только при положении стрелы параллельно земле, чего не может быть по условиям конструкции. Однако возможна разработка дополнительных моделей и проведение исследований с возможностью изменять как начальное положение машины, так и виды ковша и почв.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Акинфиев А.А. Создание системы управления операцией копания для одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения эффективности его работы: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1983. 273 с.
- 2. Chacko V., Yu H., Cang S., Vladareanu L. State of the art in excavators // Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE, 2014. P. 481–488.
- 3. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines // *Automation in Construction*. 2016. V. 68. P. 212–222.
- 4. Gustafsson J. Orientation estimation of a rigid multi body system using accelerometers, gyroscopes and the geometry. Gothenburg: Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology, Master's Thesis EX035. 2014. 79 p.
- 5. Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: A mathematical model of excavator digging and a calculation methodology: Doctoral dissertation. Virginia Tech, 2002.
- 6. Patel B.P., Prajapati J.M. A review on kinematics of hydraulic excavator's backhoe attachment // *International journal of engineering science and technology*. 2011. V. 3. № 3. P. 1990–1997.
- 7. Patel B. P., Prajapati J. M. Kinematics of mini hydraulic backhoe excavator part II // *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2013. V. 1. № 4. P. 261–282.

Для цитирования: Харитонов Н.Д, Губанов С.Г. Оптимизация гидравлического экскаватора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 56–63.

OPTIMIZING A HYDRAULIC EXCAVATOR

N.D. KHARITONOV, Postgraduate, S.G. GUBANOV, Cand. Sc.

National research technological university "MISIS", 4, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russian Federation, e-mail: e-mail: cool-kolya@mail.ru

The paper considers the issue of finding the optimal angle of penetration of the bucket into the rock in a hydraulic excavator. The study was carried out using 3D modeling and simulation technology using Autodesk Inventor software. For this, a model of the working body of the excavator was created, on which the calculations were made. The final result of the study was graphical dependencies, which show the change in the angle of penetration of the bucket from the angles of deflection of

the working boom, which allows us to conclude about a rational angle of deflection at which it is possible to reduce the working cycle of the excavator. Given the human factor and the incomplete autonomy of the excavator's working cycle, this study is more applicable to automated excavation, which the modern engineering community is striving for.

Keywords: hydraulic excavator, modeling, calculation and simulation.

REFERENCES

- 1. Akinfiev A.A. Creation of a control system for the digging operation for a single-bucket hydraulic excavator in order to increase its efficiency. Diss....cand. tech. sciences. Moscow, 1983. 273 p. (In Russian).
- 2. Chacko V., Yu H., Cang S., Vladareanu L. State of the art in excavators. *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE*, 2014, pp. 481–488.
- 3. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016. V. 68, pp. 212–222.
- 4. Gustafsson J. Orientation estimation of a rigid multi body system using accelerometers, gyroscopes and the geometry. Gothenburg: Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology, Master's Thesis EX035. 2014. 79 p.
- 5. Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: A mathematical model of excavator digging and a calculation methodology: Doctoral dissertation. Virginia Tech, 2002.
- 6. Patel B.P., Prajapati J.M. A review on kinematics of hydraulic excavator's backhoe attachment. *International journal of engineering science and technology*. 2011. V. 3. No. 3, pp. 1990–1997.
- 7. Patel B. P., Prajapati J. M. Kinematics of mini hydraulic backhoe excavator part II. *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2013. V. 1. No. 4, pp. 261–282.

Поступила в редакцию/received: 25.10.2020; после рецензирования/revised: 23.12.2020; принята/accepted 28.12.2020