

УДК 621.87

МЕТОДИКА КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ГРУЗА, ПОДНИМАЕМОГО ЭКСКАВАТОРОМ В РЕЖИМЕ КРАНА

М.С. Корытов¹, И.К. Канин²

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

²ИП Канин И.К., г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложена методика и разработана математическая модель для решения задачи косвенного измерения массы груза, поднимаемого экскаватором в режиме крана, по показаниям датчиков давления гидравлической жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндров подъема стрелы. Используются также сигналы с датчиков углов наклона стрелы и рукояти относительно гравитационной горизонтали, датчиков крена и тангажа поворотной колонки экскаватора относительно гравитационной горизонтали.

Материалы и методы. В качестве исходных данных методики косвенного измерения массы груза используются постоянные конструктивные параметры, известные постоянные массы подвижных звеньев: стрелы с гидроцилиндром рукояти, рукояти с гидроцилиндром ковша и механизмом поворота ковша, масса ковша. Используется также ряд постоянных линейных и угловых размеров машины. Для получения аналитических формул методики использованы метод однородных координат, а также метод прямого аналитического вывода.

Результаты. Представлена разработанная расчетная схема способа. Положение крана-экскаватора описывается в правой прямоугольной системе координат. Представлена методика косвенного измерения массы груза по показаниям датчиков давления гидравлической жидкости в виде линейной последовательности формул.

Обсуждение и заключение. Проведена оценка точности разработанной методики путем сопоставления с результатами натурального эксперимента. Относительная приведенная погрешность измерения в исследуемом диапазоне измерения углов стрелы и рукояти крана-экскаватора составила менее десяти процентов. К достоинствам методики относятся ее простота, а также учет значений углов крена и тангажа поворотной колонки крана-экскаватора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кран-экскаватор, масса груза, измерение, давление, крен, тангаж.

© М.С. Корытов, И.К. Канин, 2018



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

INDIRECT MEASUREMENT METHODOLOGY OF CARGO WEIGHT LIFTED BY THE EXCAVATOR IN THE CRANE MODE

M.S. Korytov¹, I.K. Kanin²

¹FGBOU VO «SIBADI», Omsk, Russia

²IP. Kanin I.K., Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. To solve the indirect measurement problem of the cargo weight lifted by the excavator in crane mode the authors propose the specific method and develop mathematical model according to the indications of hydraulic fluid pressure sensors in the piston and rod cavities of boom lifting cylinders. Moreover, the signals from the angle sensor of the boom and the handle relative to the gravity horizon are used, the roll and pitch sensors of the rotary column of the excavator relative to the gravity horizon are additionally applied.

Materials and methods. As initial data of the indirect measurement method of cargo mass, constant design parameters, constant masses of moving links are used, such as booms with handle hydraulic cylinder, handles with bucket hydraulic cylinder and bucket turning mechanism, bucket weight. In addition, constant linear number and angular machine dimensions are included in the investigation. To obtain analytical formulas of the method, the method of homogeneous coordinates is applied, as well as the method of direct analytical inference.

Results. The developed design scheme of the method is presented. As a result, the position of the excavator crane is described in the right-hand rectangular coordinate system. Moreover, the technique of indirect measurement of cargo mass according to the indications of hydraulic fluid pressure sensors in the form of formulae linear sequence is presented.

Discussion and conclusion. The accuracy of the developed method was estimated by comparison with the results of the full-scale experiment. The relative reduced measurement error in the range of boom angles' measurement and the crane-excavator handle was less than ten percent. Therefore, the technique merits are its simplicity, as well as record of the roll and pitch angles of the crane-excavator turntable element.

KEYWORDS: crane-excavator, cargo mass, measurement, pressure, roll, pitch.

© M.S. Korytov, I.K. Kanin, 2018



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности общестроительных работ может быть достигнуто за счет универсализации и расширения технологических возможностей строительной техники и прежде всего одного из ее основных видов, одноковшовых экскаваторов. Перспективными в этом плане являются унифицированные рабочие органы одноковшовых экскаваторов, позволяющие выполнять различные технологические операции, в первую очередь грузоподъемные [1].

Грузоподъемное устройство экскаватора может быть закрепленным или съемным. Это устройство может быть размещено на ковше, рукояти или любой другой части машины или быть независимым¹.

Наиболее распространенным примером может служить оснащение ковша экскаватора дополнительным навесным устройством в виде крюковой подвески с крюком откидного типа либо приваренным при помощи сварки крюком. Это позволяет выполнять при помощи одной машины производство земляных работ в режиме экскаватора и перемещение грузов, погрузочно-разгрузочные работы в крановом режиме.

В то же время при выполнении любой машиной, например экскаватором, в режиме крана операций подъема и перемещения груза возникает необходимость измерения массы груза, в частности, для предотвращения перегрузки машины и обеспечения ее безопасной работы.

Это обуславливает необходимость разработки методики измерения массы поднимаемого груза с учетом кинематики машины.

Для измерения массы в разных областях техники применяются различные подходы. Основным способом измерения массы груза, поднимаемого и перемещаемого машиной, является измерение силы, действующей на элементы ее конструкции.

В работах [2, 3, 4] авторами предлагается

бесконтактный способ оценки предельно-допустимых значений массы груза, поднимаемого (перемещаемого) грузоподъемными машинами, по значению величины напряженности магнитного поля, которое создается двигателем постоянного тока. Измерение слабого магнитного поля при этом производится на основе феррозондовых датчиков [4]. Подобный подход может быть использован только для машин с электрическим приводом.

Динамическое взвешивание сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе осуществляют с помощью силоизмерительных аналоговых датчиков (тензометрического типа), воспринимающих силы тяжести как конвейерной ленты, так и груза на ней².

Измерительная система для взвешивания отходов металла, перемещаемых грузоподъемным краном, включает датчик массы, устанавливаемый на крюке крана [5]. Для кранов мостового и башенного типов, кроме взвешивания на крюке, применяют еще несколько типовых схем взвешивания: взвешивание на траверсе, взвешивание грузовой тележки, измерение натяжения каната, взвешивание на блоке роликов полиспаста³. Крановые весы, висящие на крюке крана, должны иметь разрешение Ростехнадзора на применение в качестве съемного грузозахватного приспособления⁴. Для плавучих судов распространен способ определения массы груза по осадкам судна [6].

Ряд авторов для измерения массы материала, поднимаемого машиной с гидравлическим приводом оборудования, предлагает использовать давления гидравлической жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндров подъема подвижных звеньев оборудования. Подход, основанный на измерении массы груза по давлениям в силовых гидроцилиндрах рабочего оборудования, характеризуется большей безопасностью по сравнению с весами, висящими на крюке крана. Есть примеры успешного применения данного подхода для

¹ ГОСТ Р ИСО 20474–1–2011. Машины землеройные. Безопасность. Часть 1. Общие требования. Введ. 2013–01–01. М. : Стандартинформ, 2012. 20 с.

² Кравов М.Р., Шестов Д.А., Шилин Д.В. Динамическое взвешивание сыпучих материалов на поточном расходомере-дозаторе // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: материалы VII Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых. Омск: ОмГТУ, 2017. С. 55–57.

³ Схемы взвешивания грузов подъемными кранами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://etalon-vesprom.ru/shemyi-vzveshivaniya-gruzov-podemnyimi-kranami/>, свободный (дата обращения : 26.04.2018).

⁴ Крановые весы бывают разными – опасными и безопасными! [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://m.tenso-m.ru/publications/330/>, свободный (дата обращения : 26.04.2018).

таких машин, как фронтальные погрузчики⁵, а также грузоподъемные краны с телескопической стрелой⁶.

Авторами [7, 8] разработано экспериментальное устройство для гидравлического взвешивания груза на базе стенда FESTO «Гидравлика» с применением промышленного контроллера. Устройство воспроизводит подъем груза фронтальным погрузчиком.

Масса груза при загрузке карьерных автосамосвалов определяется по давлению газа в цилиндрах подвески кузова [9].

Авторами работы [10] при помощи эмпирических коэффициентов при измерении массы материала в ковше экскаватора по давлениям жидкости в гидроцилиндрах стрелы учитываются силы трения и динамические моменты инерции подвижных звеньев.

В работе [11] описывается система индикации момента нагрузки автомобильного крана, которая включает датчик угла стрелы, датчик длины телескопической стрелы, датчики давления в полостях силового гидроцилиндра подъема стрелы, антиблокировочный выключатель, индикатор, установленный в кабине автокрана. Работа системы моделируется при помощи имитационной модели.

Как правило, косвенно измеренная масса груза, перемещаемого грузоподъемной машиной, используется в качестве одного из информационных параметров комплексной автоматизированной системы безопасности машины [12, 13, 14].

Проведенный анализ показывает, что для гидравлических одноковшовых экскаваторов наиболее простым и надежным способом определения массы груза является косвенное измерение ее по давлениям гидравлической жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндров рабочего оборудования.

Силовыми элементами в гидравлическом одноковшовом кране-экскаваторе являются гидроцилиндры стрелы, рукояти и ковша. В режиме работы крана ковш максимально повернут к рукояти на постоянный конструктивно заданный угол. Силу для определения массы груза целесообразно измерять на основе давлений гидравлической жидкости в попарно объединенных поршневых и штоковых полостях двух гидроцилиндров подъема стрелы.

Необходим вывод математических зависимостей, соответствующих кинематической схеме экскаватора, позволяющих решать поставленную задачу косвенного измерения массы груза по давлениям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Положение крана-экскаватора описывается в правой прямоугольной системе координат (СК) $O_0X_0Y_0$, начало которой находится в точке оси вращения стрелы относительно поворотной колонки (в точке нижнего шарнира стрелы). Ось O_0X_0 указанной СК параллельна гравитационной горизонтали, а ось O_0Y_0 – гравитационной вертикали.

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), в точке нижнего шарнира стрелы находится также начало СК $O_1X_1Y_1$. Ось O_1X_1 , указанная СК, параллельна гравитационной горизонтали и совпадает с осью O_0X_0 , а ось O_1Y_1 находится в плоскости вращения стрелы. Угол крена колонки между осями O_0Y_0 и O_1Y_1 равен β (на схеме рисунка 1 не показан).

В точке нижнего шарнира стрелы находится также начало СК $O_2X_2Y_2$, связанной с поворотной колонкой. Ось O_2Y_2 параллельна оси вращения поворотной колонки относительно базового шасси, а ось O_2X_2 расположена в плоскости, параллельной плоскости поворота стрелы.

В точке нижнего шарнира стрелы находится также начало СК $O_3X_3Y_3$, связанной со стрелой. Ось O_3X_3 соединяет точку нижнего шарнира стрелы O_3 и точку верхнего шарнира стрелы O_4 (точку оси вращения рукояти относительно стрелы).

В точке верхнего шарнира стрелы O_4 находится начало СК $O_4X_4Y_4$, связанной с рукоятью. Ось O_4X_4 соединяет точку оси вращения рукояти O_4 и точку 4 оси вращения крюка.

Направления всех углов для рассматриваемого расположения осей СК будут положительными при вращении на расчетной схеме по часовой стрелке.

Первичные информационные параметры. В качестве первичных информационных параметров методики косвенного измерения массы груза, поднимаемого экскаватором в режиме крана, по показаниям датчиков, выступают следующие: P_p – давление гидравлической

⁵Корытов М.С. Разработка методов измерения массы материала в ковше и запаса устойчивости фронтального погрузчика : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Корытов М. С. Омск, 1999. 22 с.

⁶Коровин К.В. Автоматизированная система ограничения массы поднимаемого груза стреловых грузоподъемных кранов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Коровин К.В. Челябинск, 2010. 22 с.

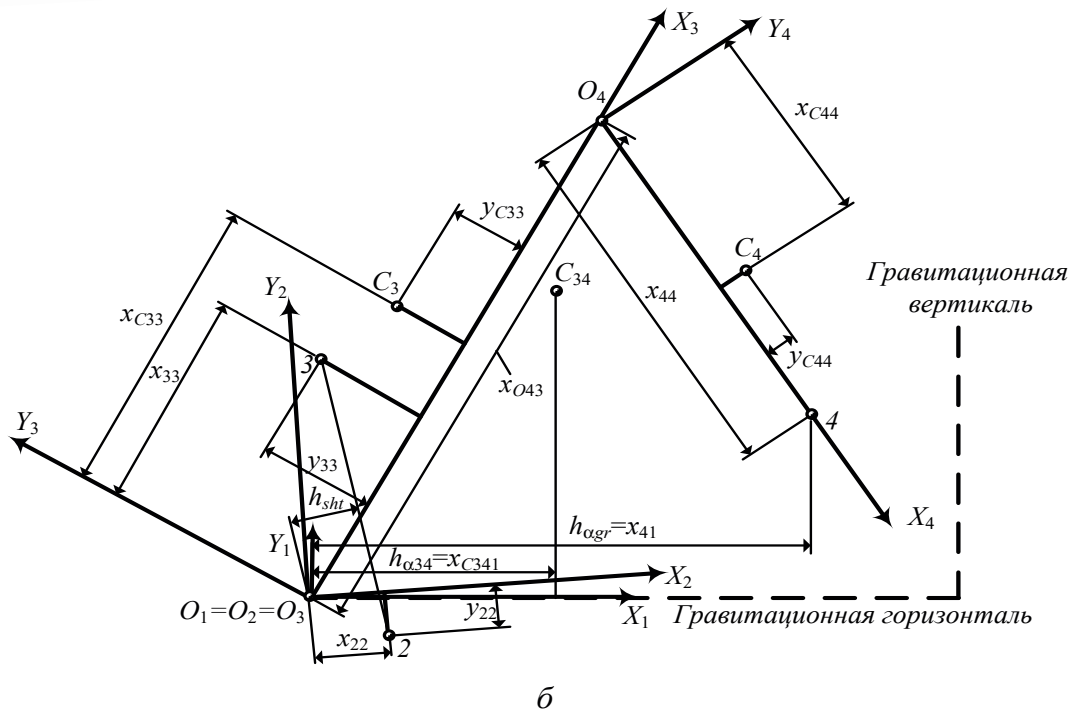
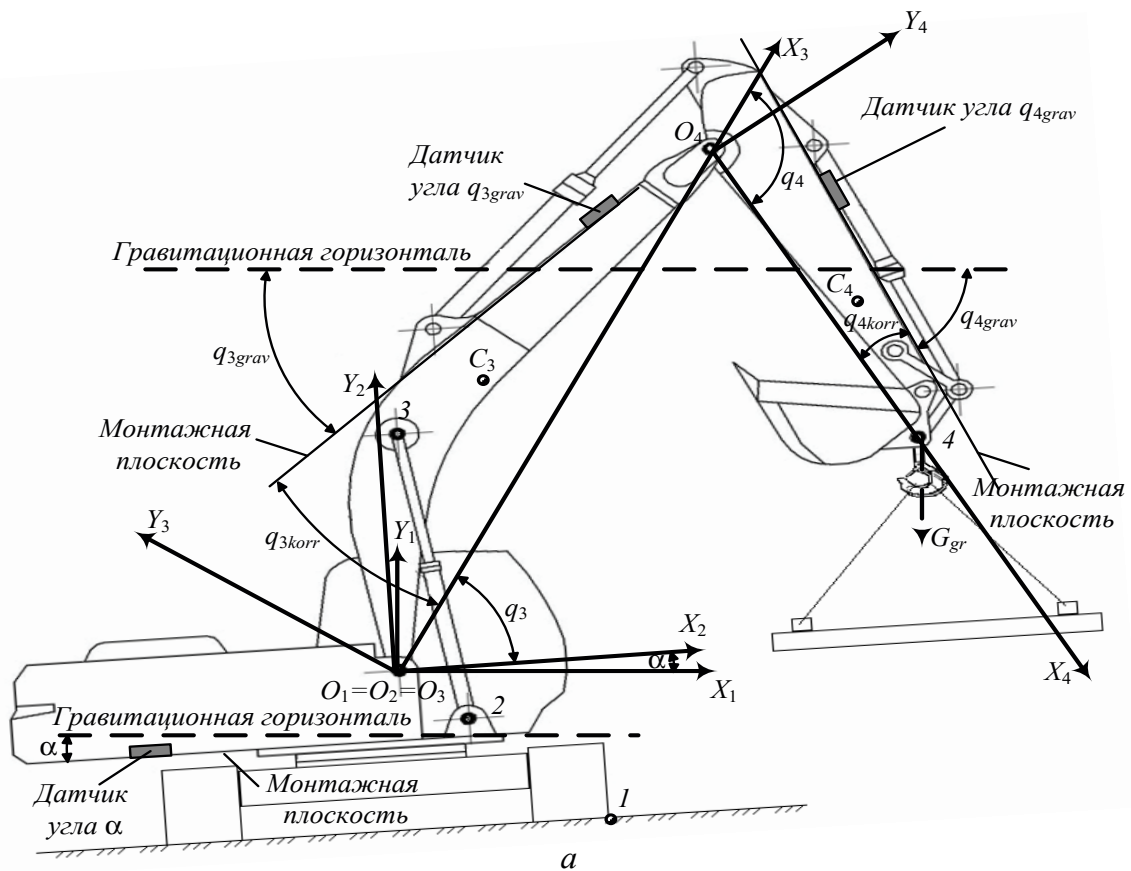


Рисунок 1 – Расчетная схема для методики косвенного измерения массы груза, поднимаемого экскаватором в режиме крана, по показаниям датчиков: а – угловые размеры, точки центров масс подвижных звеньев, точки приложения сил; б – линейные размеры точек в локальных системах координат

Figure 1 – Calculation scheme for the method of indirect measurement of cargo mass lifted by the excavator in crane mode, according to the sensors: а – angular dimensions, points of mass centers of mobile links, points of force application; б – linear points dimensions in local coordinate systems

Источник: составлено авторами

жидкости в поршневой полости гидроцилиндров (ГЦ) подъема стрелы экскаватора, Па; P_{sht} – давление гидравлической жидкости в штоковой полости ГЦ подъема стрелы экскаватора, Па; α – угол наклона грузовой колонки в направлении качания стрелы (угол тангажа), рад.; β – угол наклона грузовой колонки в направлении, перпендикулярном плоскости качания стрелы (угол крена), рад.; q_{3grav} – угол монтажной плоскости датчика наклона стрелы относительно гравитационной горизонтали, рад.; q_{4grav} – угол монтажной плоскости датчика наклона рукояти относительно гравитационной горизонтали, рад. (см. рисунок 1).

Все перечисленные параметры измеряются датчиками первичной измерительной информации, установленными на экскаваторе.

Постоянные конструктивные параметры. В качестве исходных данных в методике используются также постоянные (конструктивные) параметры с известными значениями, определенными предварительными однократными измерениями, либо заданными проектной документацией на изготовление узлов и деталей машины.

Это постоянные массы подвижных звеньев рабочего оборудования, линейные и угловые размеры, площади: m_3 – масса стрелы с ГЦ рукояти, кг; m_4 – масса рукояти с ковшом, гидроцилиндром ковша и рычагами механизма поворота ковша, кг; S_p – площадь поршневой полости одного из двух ГЦ подъема стрелы:

$$S_p = (\pi \cdot D^2) / 4,$$

где D – диаметр поршневой полости ГЦ стрелы, м;

S_{sht} – площадь штоковой полости одного из двух ГЦ подъема стрелы:

$$S_{sht} = (\pi \cdot d^2) / 4,$$

где d – диаметр штоковой полости ГЦ стрелы, м;

x_{22}, y_{22} – координаты точки 2 крепления гильзы ГЦ стрелы на поворотной колонке в системе координат колонки $O_2 X_2 Y_2$, м; x_{33}, y_{33} – координаты точки 3 крепления штока ГЦ стрелы на стреле, м; x_{O43} – координата точки шарнира рукояти O_4 в СК стрелы $O_3 X_3 Y_3$, м; x_{44} – координата точки 4 оси вращения крюка в СК рукояти $O_4 X_4 Y_4$, м; x_{C33}, y_{C33} – координаты центра масс стрелы с ГЦ рукояти в СК стрелы $O_3 X_3 Y_3$, м; x_{C44}, y_{C44} – координаты центра масс рукояти с ковшом и механизмом ковша в СК рукояти $O_4 X_4 Y_4$, м; q_{3korr} – угол между монтажной плоскостью датчика угла наклона стрелы

и осью $O_3 X_3$, град.; q_{4korr} – угол между монтажной плоскостью датчика угла наклона рукояти и осью $O_4 X_4$, град.

Описание методики измерения массы груза. Измерение массы груза в отдельный такт времени заключается в последовательном выполнении всех перечисленных ниже шагов расчетов по текущим показаниям датчиков. Предполагается использование микропроцессора. Приведенные ниже геометрические математические зависимости получены по расчетной схеме (см. рисунок 1).

1. Определяется угол поворота стрелы относительно колонки:

$$q_3 = (q_{3grav} + q_{3korr}) - \alpha. \quad (1)$$

2. Определяется угол поворота рукояти относительно стрелы:

$$q_4 = (q_{4grav} + q_{4korr}) - (q_{3grav} + q_{3korr}). \quad (2)$$

3. Определяется сила на штоках двух ГЦ подъема стрелы, уравнивающая силы тяжести всех подвижных звеньев рабочего оборудования и груза, действующая в направлении перемещения штоков:

$$F = P_p \cdot 2 \cdot S_p - P_{sht} \cdot (2 \cdot S_p - 2 \cdot S_{sht}). \quad (3)$$

4. Определяются координаты точки 3 крепления штока ГЦ стрелы на стреле в СК поворотной колонки $O_2 X_2 Y_2$:

$$\begin{aligned} x_{32} &= x_{33} \cdot \cos(q_3) + y_{33} \cdot \sin(q_3); \\ y_{32} &= y_{33} \cdot \cos(q_3) - x_{33} \cdot \sin(q_3). \end{aligned} \quad (4)$$

5. Определяется плечо действия силы на штоках двух ГЦ подъема стрелы относительно точки O_2 подвеса стрелы на колонке:

$$h_{sht} = \frac{|(x_{32} \cdot y_{22} - y_{32} \cdot x_{22})|}{\sqrt{((y_{32} - y_{22})^2 + (x_{32} - x_{22})^2)}}. \quad (5)$$

6. Определяется момент силы, создаваемый ГЦ стрелы относительно точки O_2 подвеса стрелы на колонке:

$$M_b = F \cdot h_{sht} \quad (6)$$

7. Определяется угол наклона оси $O_3 X_3$ стрелы относительно оси $O_1 X_1$ (гравитационной горизонтали):

$$q_{3\alpha} = q_3 + \alpha. \quad (7)$$

8. Определяется горизонтальная координата точки C_3 центра масс стрелы с ГЦ рукояти в СК $O_1 X_1 Y_1$:

$$x_{C31} = x_{C33} \cdot \cos(q_{3a}) + y_{C33} \cdot \sin(q_{3a}). \quad (8)$$

9. Определяется горизонтальная координата точки C_4 центра масс рукояти с ковшем, ГЦ ковша и рычагами механизма поворота ковша в СК $O_1X_1Y_1$:

$$x_{C41} = x_{C44} \cdot (\cos(q_{3a}) \cdot \cos(q_4) - \sin(q_{3a}) \cdot \sin(q_4)) + y_{C44} \cdot (\cos(q_{3a}) \cdot \sin(q_4) + \sin(q_{3a}) \cdot \cos(q_4)) + x_{O43} \cdot \cos(q_{3a}). \quad (9)$$

10. Определяется горизонтальная координата общего центра масс подвижных звеньев экскаватора без груза в СК $O_1X_1Y_1$. Она будет являться плечом действия силы тяжести общего центра масс подвижных звеньев экскаватора без груза относительно точки подвеса стрелы на колонке с учетом угла тангажа:

$$h_{a34} = x_{C341} = (m_3 \cdot x_{C31} + m_4 \cdot x_{C41}) / (m_3 + m_4). \quad (10)$$

11. С учетом угла крена колонки β определяется компонента силы тяжести общего центра масс подвижных звеньев экскаватора без груза, действующая вдоль оси O_1Y_1 (компонента, создающая момент вращения стрелы):

$$G_{\beta34} = (m_3 + m_4) \cdot g \cdot \cos(\beta). \quad (11)$$

12. Определяется горизонтальная координата точки 4 в СК $O_1X_1Y_1$. Она будет являться плечом действия силы тяжести груза относительно точки подвеса стрелы на колонке с учетом угла тангажа:

$$h_{aGr} = x_{41} = x_{44} \cdot (\cos(q_{3a}) \cdot \cos(q_4) - \sin(q_{3a}) \cdot \sin(q_4)) + x_{O43} \cdot \cos(q_{3a}). \quad (12)$$

13. Учитывая, что моменты, создаваемые силами тяжести груза и подвижных звеньев, уравновешиваются моментом, создаваемым ГЦ стрелы ($M_b = h_{a34} \cdot G_{\beta34} + h_{aGr} \cdot G_{\beta Gr}$), определяется компонента силы тяжести груза, действующая вдоль оси O_1Y_1 (компонента силы тяжести груза, создающая момент вращения стрелы):

$$G_{\beta Gr} = (M_b - h_{a34} \cdot G_{\beta34}) / h_{aGr}. \quad (13)$$

14. С учетом угла крена колонки β определяется непосредственно масса груза:

$$m_{Gr} = G_{\beta Gr} / (\cos(\beta) \cdot g). \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для верификации разработанной методики массы груза, полученные по приведенным выше аналитическим зависимостям, т.е. по значениям показаний датчиков первичной измерительной информации, были сопоставлены с действительными значениями тарированных масс груза, поднятых экскаватором в режиме крана. Натурный эксперимент проводился на экскаваторе марки Hitachi ZX-200. Общий вид машины и места установки датчиков первичной измерительной информации показаны на рисунке 2. Все конструктивные размеры и массы подвижных звеньев в методике задавались соответствующими указанной марке машины, согласно технической документации на экскаватор и результатам натурных измерений.



а



б

Рисунок 2 – Экскаватор марки Hitachi ZX-200, на котором проводился натурный эксперимент, с установленными на нем датчиками первичной измерительной информации: а - угломеры рабочего оборудования; б - датчики давления гидроцилиндра стрелы

Figure 2 – Hitachi ZX-200 excavator with installed on it primary measurement sensors, on which full-scale experiment was conducted: а - working equipment inclinometers; б - pressure sensors of boom hydraulic cylinders

Источник: составлено авторами

В качестве угломеров для верификации методики использовались датчики угла наклона NI I82P-4P12-P-C научно-производственной компании «Теко» (г. Челябинск), в которых в качестве чувствительных элементов измерения угла наклона выступают акселерометры.

В качестве датчиков давления применялись высокоточные цифровые датчики избыточного давления ZET 7012-I1 предприятия «Электронные технологии и метрологические системы» на базе СКБ ФГУП ВНИИФТРИ (компания ZETLAB, г. Москва).

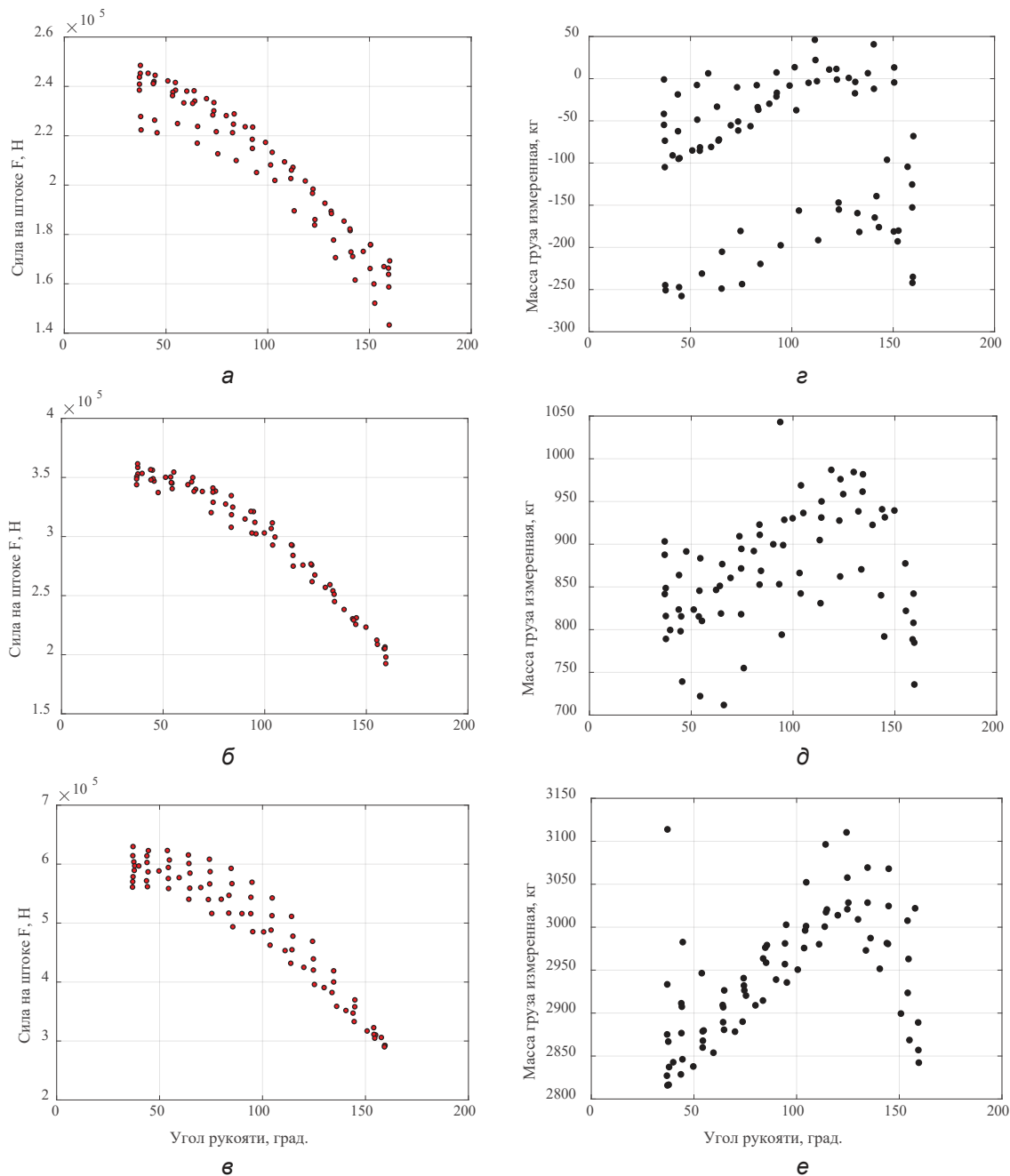


Рисунок 3 - Часть результатов натурного эксперимента в виде зависимостей сил на штоках гидроцилиндров подъема стрелы от угла рукоятки при трех значениях тарированной массы груза (а – 0 кг, б – 985 кг, в – 2 840 кг) и соответствующих им вычисленных по методике значений массы груза (г – 0 кг, д – 985 кг, е – 2 840 кг)

Figure 3 – Part of full-scale experiment results in the form of forces dependencies of the rods of lifting cylinders' boom from the handle angle at three values of tare cargo weight (а – 0 kg, б – 985 kg, в – 2 840 kg) and corresponding weight values (г – 0 kg, д – 985 kg, е – 2 840 kg)

Источник: составлено авторами

Угол наклона стрелы относительно колонки с расчетной схемы (см. рисунок 1) при проведении натурного эксперимента варьировался от -4 до -60 градусов, а угол наклона рукояти относительно стрелы – от 37 до 160 градусов. Шаг каждого из углов составлял не более $10-12$ градусов. Использовались три тарированные массы груза: $0, 985$ и $2\,840$ кг. Были исследованы различные сочетания углов стрелы и рукояти (с учетом ограничений диаграммы грузоподъемности), а также тарированной массы груза, общим числом 230 экспериментальных точек. Измерениям в каждой точке подвергались угол стрелы, угол рукояти, давление в поршневой полости гидроцилиндров подъема стрелы, давление в штоковой полости гидроцилиндров подъема стрелы, угол крена поворотной колонки, угол тангажа поворотной колонки.

Часть обработанных экспериментальных точек приведена на рисунке 3 в виде силы на штоках двух ГЦ подъема стрелы (а, б, в), а также в виде вычисленных по разработанной методике значений массы груза (г, д, е). Зависимости на рисунке 3 приведены от угла поворота рукояти q_4 . Для тарированных масс груза $0, 985$ и $2\,840$ кг. Для всех рассматриваемых значений угла наклона стрелы из исследованного диапазона, взятых по результатам натурного эксперимента. Углы крена и тангажа поворотной колонки при этом принимали фиксированные значения. Их абсолютная величина во всех экспериментальных точках не превышала трех градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов натурного эксперимента позволил сделать следующие выводы. Разработанная методика измерения массы была верифицирована путем проведения натурного эксперимента с тарированными массами на крюке экскаватора в режиме крана, вычислений массы по методике сопоставления вычисленных значений масс и тарированных значений масс. Максимальная абсолютная погрешность косвенного измерения по данным натурного эксперимента составила 273 кг. Соответственно, относительная приведенная к верхнему пределу измерений (2840 кг) погрешность при этом составила менее 10% .

Предлагаемая методика не требует сложного технологического оборудования, дорогостоящих датчиков первичной измерительной информации и больших затрат на измерения.

Алгоритм однократный, без необходимости хранения данных предыдущих тактов в памяти микропроцессора.

К его достоинствам следует также отнести возможность учета значений углов крена и тангажа поворотной колонки крана-экскаватора.

Область применения методики – информационные системы указания грузоподъемности, фиксирующие грузоподъемность экскаватора, работающего в режиме крана в зависимости от вылета грузозахватного органа. В перспективе методика может также быть использована в системе ограничения грузоподъемности, которая автоматически выключает механизмы экскаватора в режиме крана при превышении допустимой грузоподъемности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Треногин Е.О., Вахрушев С.И. Патентные исследования возможных конструкций рабочего оборудования одноковшового экскаватора // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 2. С. 303–311.
2. Дубровин Л.М., Никишечкин А.П., Давыденко В.И. Контроль грузов на подъемно-транспортных машинах // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 3 (64). С. 98–105.
3. Никишечкин А.П., Дубровин Л.М., Давыденко В.И. Способ оценки массы груза подъемно-транспортных устройств по параметрам магнитного поля, создаваемого двигателем постоянного тока // Вестник МГТУ «Станкин». 2016. № 1. С. 64–67.
4. Никишечкин А.П., Дубровин Л.М., Давыденко В.И. Двигатель постоянного тока как источник диагностической информации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 7. С. 53–58.
5. Жиров В.Г. Измерительная система взвешивания отходов металла // Датчики и системы. 2014. № 12. С. 66–67.
6. Якута И.В., Ермаков С.В. Оценка расхода масс принятого и сданного грузов при определении массы по осадкам (методом драфт-сюрвея) // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 822–829.
7. Иванов В.А., Макагон Н.С., Масленко В.О. Экспериментальный образец бортовой системы взвешивания груза [Электронный ресурс] // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Том 8, № 4. С. 1–9. Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_259.pdf, свободный (дата обращения: 26.04.2018).
8. Иванов В.А., Масленко В.О., Харченко К.А. Экспериментальное устройство для ги-

дравлического взвешивания груза [Электронный ресурс] // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Том 8, № 1. С. 128–137. – Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_25.pdf, свободный (дата обращения : 26.04.2018).

9. Большунова О.М., Коржев А.А., Камышьян А.М. Модернизация бортовой системы карьерного автосамосвала // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. СПб: СПГУ, 2017. С. 110–114.

10. Gawlik A., Kucybała, P. Dynamic weighing system used in excavator. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 24, no. 4, 2017, pp. 31–38.

11. Kalairassan G., Boopathi M., Mohan R. M. Analysis of load monitoring system in hydraulic mobile cranes. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 263, no. 6, 2017, pp. 062045. DOI: 10.1088/1757-899X/263/6/062045

12. Krastanov, K. About the safety by using of mobile cranes. *The Eurasia proceedings of science, technology, engineering and mathematics*, 2017, vol. 1, pp. 213–217. <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/38004>

13. Walawalkar A., Heep S., Schindler C., Leifeld R., Frank M. Validation of an analytical method for payload estimation in excavators. In: Berns K. et al. (eds) *Commercial Vehicle Technology 2018. Proceedings*. Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 3–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-21300-8_1

14. Koch S., Reichhartinger M. Observer-based sliding mode control of hydraulic cylinders in the presence of unknown load forces. *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2016) 133/6: 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-016-0418-6>

REFERENCES

1. Trenogin E.O., Vahrushev S.I. Patent research of possible designs of working equipment of a single bucket excavator. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*, 2016, vol. 2, pp. 303–311.

2. Dubrovin L.M., Nikishechkin A.P., Davydenko V.I. Cargo control on hoisting-and-transport machines. *Mir transporta*, 2016, vol. 14, no. 3 (64), pp. 98–105.

3. Nikishechkin A.P., Dubrovin L.M., Davydenko V.I. A method for estimating the weight of a load of hoisting-and-transport devices using the

parameters of the magnetic field produced by a direct current motor. *Vestnik MGТУ «Stankin»*, 2016, no. 1, pp. 64–67.

4. Nikishechkin A.P., Dubrovin L.M., Davydenko V.I. Direct current motor as a source of diagnostic information. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2016, no. 7, pp. 53–58.

5. Zhiron V.G. Measuring system for weighing metal waste. *Datchiki i sistemy*, 2014, no. 12, pp. 66–67.

6. Jakuta I.V., Ermakov S.V. Estimation of the divergence of the masses of the received and delivered cargo in determining the mass by precipitation (the method of draft survey). *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 822–829.

7. Ivanov V.A., Makagon N.S., Maslenko V.O. Experimental sample of airborne cargo weighing system [Electronic resource]. *Uchenye zametki TOGU*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 1–9. Access mode : http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_259.pdf, free (date of the application : 26.04.2018).

8. Ivanov V.A., Maslenko V.O., Harchenko K.A. Experimental device for hydraulic weighing of cargo [Electronic resource]. *Uchenye zametki TOGU*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 128–137. – Access mode : http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_25.pdf, free (date of the application : 26.04.2018).

9. Bol'shunova O.M., Korzhev A.A., Kamysh'jan A.M. Modernization of the on-board system of a quarry dump truck. *Innovacii i perspektivy razvitija gornogo mashinostroenija i jelektromehaniki: IPDME-2017 : Sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii*. SPb : SPGU, 2017, pp. 110–114.

10. Gawlik A., Kucybała, P. Dynamic weighing system used in excavator. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 24, no. 4, 2017, pp. 31–38.

11. Kalairassan G., Boopathi M., Mohan R. M. Analysis of load monitoring system in hydraulic mobile cranes. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 263, no. 6, 2017, pp. 062045. DOI: 10.1088/1757-899X/263/6/062045

12. Krastanov, K. About the safety by using of mobile cranes. *The Eurasia proceedings of science, technology, engineering and mathematics*, 2017, vol. 1, pp. 213–217. <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/38004>

13. Walawalkar A., Heep S., Schindler C., Leifeld R., Frank M. Validation of an analytical method for payload estimation in excavators. In: Berns K.

et al. (eds) Commercial Vehicle Technology 2018. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 3–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-21300-8_1

14. Koch S., Reichhartinger M. Observer-based sliding mode control of hydraulic cylinders in the presence of unknown load forces. *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2016) 133/6: 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-016-0418-6>

Поступила 04.05.2018, принята к публикации 25.06.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корытов Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф. АКМиТ, 644080, г. Омск, пр. Мира 5, kms142@mail.ru.

Канин Иван Константинович, инд. предприниматель, г. Москва, kanin3d@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korytov Mikhail Sergeevich, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, ResearcherID B-5667-2015, FGBOU VO «SIBADI», Professor of the Department AKMiT, 644080, Omsk, 5 Mira Avenue, kms142@mail.ru.

Kanin Ivan Konstantinovich, ind. businessman, Moscow, kanin3d@yandex.ru.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М.С. Исследование состояния вопроса, вывод уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности методики, вычислительная проверка методики.

Канин И.К. Проведение натурного эксперимента на кране-экскаваторе, обработка результатов натурного эксперимента.

AUTHOR CONTRIBUTION

Korytov M.S. Researching process, conclusion of the mathematical model equations, development of software product for checking work capacity of mathematical model.

Kanin I.K. Carrying out full-scale experiment on the crane-excavator, processing results of full-scale experiment.