Моделирование псевдоферменной конструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора

О.А. Зотов¹, Д.Ю. Густов²

¹ Пневмакс, 141400, г. Химки, Коммунальный пр., вл. 30;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Одноковшовые гидравлические экскаваторы становятся многофункциональными машинами широкого круга использования. Модернизация машины в целом и отдельных ее узлов актуальна с целью снижения материалоемкости и повышения устойчивости и производительности. Изучены результаты компьютерного моделирования рабочего оборудования экскаватора, выполненного с целью снижения массы оборудования. Эти данные могут быть использованы для совершенствования оборудования экскаваторов при работе с нестандартным рабочим оборудованием повышенной массы.

Материалы и методы. В качестве прототипа взято рабочее оборудование экскаватора Hitachi ZX270. Компьютерное моделирование и расчет рабочего оборудования произведен с применением программы T-FLEX. Расчет проведен для разных режимов работы экскаватора и при различных ориентациях стрелы, рукояти и ковша относительно друг друга: копание всей шириной ковша и копание одним зубом, поворот груженого экскаватора на выгрузку. В рассмотренных расчетных схемах возникают наибольшие напряжения в элементах металлоконструкции. Расчеты выполнены без учета колебаний, возникающих в переходных режимах работы и при стопорении.

Результаты. Определено напряженно-деформированное состояние псевдоферменного рабочего оборудования экскаватора с различными вариантами облегченного исполнения на основе компьютерного моделирования. Установлены зоны наибольших напряжений и деформаций, а также даны предложения по их снижению. Результаты исследований использованы для оптимизации конструкции стрелы и рукояти по критерию минимизации формируемых напряжений.

Выводы. Полученные данные и сформулированные рекомендации являются основой дальнейшего детального моделирования псевдоферменных конструкций рабочего оборудования экскаваторов и других машин различного исполнения и назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: псевдоферменная конструкция, металлоконструкция, рабочее оборудование, стрела, рукоять, экскаватор, компьютерное моделирование, напряжения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зотов О.А., Густов Д.Ю. Моделирование псевдоферменной конструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 376–385. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.376-385

Simulating pseudotruss excavating part of excavators

Oleg A. Zotov¹, Dmitriy Yu. Gustov²

¹ Pneumax, 30 vlad. Communal proezd, Khimki, 141400, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Single-dipper hydraulic excavators are becoming widely used multifunctional machines. Upgrading the machine as a whole and its assemblies is an actual problem to be solved with the aim of reducing material consumption and increasing stability and throughput. The article presents results of computer simulation of the excavating part designed to reduce the weight of the equipment. These data can be used to improve the equipment of excavators when operating with non-standard excavating equipment of increased weight.

Materials and methods. The excavating equipment of the Hitachi ZX270 excavator is taken as a prototype. Computer simulating and calculation of the excavating part is conducted using the T-FLEX software. The calculation is carried out for different modes of the excavator operation and for different orientations of the jig boom, dipper stick and dipper relative to each other: excavating with the entire width of the dipper, single-tooth excavating, swiveling the loaded excavator for unloading. The highest stresses arise in structural members in the considered calculation cases. The calculations are performed without accounting the oscillations occurring at transient operating modes and during locking.

Results. The study determines a stress-deformed condition of the pseudotruss excavating part structures of the excavator with various lightened makes selected on the basis of computer simulation. Zones of the highest stresses and largest deformations are revealed as well as suggestions on their decrease are made. The research results are used to optimize the jig boom and dipper stick structures by the criterion of generated stress minimization.

Conclusions. The obtained data and formulated recommendations are the basis for further detailed simulation of pseudotruss excavating part structures of excavators and other machines of various layouts and purposes.

KEYWORDS: pseudotruss structure, metalwork, excavating part, jig boom, dipper stick, excavator, computer simulation, stress

FOR CITATION: Zotov O.A., Gustov D.Yu. Simulating pseudotruss excavating part of excavators. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:3:376-385. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.376-385 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Универсальный гидравлический экскаватор — многофункциональная машина, применяемая помимо основной экскавационной функции и для выполнения различных видов работ, для которых он изначально не проектировался. Рабочие органы специального назначения требуют разработки или существенной переработки конструктивного исполнения всего рабочего оборудования, обеспечивающего не просто увеличение рабочей зоны, но другую кинематику механизма [1–4]. При этом классическое исполнение рабочего оборудования по-прежнему остается наиболее распространенным, но требует модернизации, направленной на повышение экономичности и технологичности.

Это связано с тем, что экскаватор, оборудованный «стандартным» экскавационным оборудованием применяется с различным сменным оборудованием: гидромолотами [5], гидроразрывными устройствами [6], рыхлителями и мн. др. [7]. Это приводит к возникновению разнообразных схем нагружения, что существенно усложняет проектирование.

При использовании экскаваторов малой и средней массы часто сменное рабочее оборудование крепится не к рукояти, а к быстросменному захвату, который по своим функциям позволяет вращать и наклонять рабочий орган. Лидер в производстве таких наклонно-поворотных платформ (tiltrotator) компания Engcon¹ выпускает наклонно-поворотные платформы различной массы, добавляя примерно 25–40 % и даже более к массе сменного рабочего оборудования.

Основываясь на отмеченном, к анализу был принят вариант модернизации рабочего оборудования экскаватора, направленный на снижение массы его рабочего оборудования, в котором облегчение конструкции обеспечивается переходом от балочной стрелы и рукояти коробчатого сечения к псевдоферме — коробчатой конструкции с вырезами разгрузками, облегчающими конструкцию [8].

Теоретически, задача выбора оптимальной конструкции рабочего оборудования экскаватора является многокритериальной и принимаемой в условиях риска [9–12]. Однако применение существующего программного обеспечения предлагает широкий спектр вариантов и методик компьютерного моделирования как на стадии проектирования [13–20], так и на стадии оптимизации конструкции и прогнозирования ее состояния в процессе эксплуатации [21–26].

Компьютерное моделирование позволило итерационными методами получить псевдоферменную конструкцию, обосновать особенности выполненной модернизации и выработать рекомендации для дальнейшей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Линейные размеры рабочего оборудования определяют на основе теории подобия, согласно которой линейные ($A_{пр}$, $A_{ан}$), объемные ($q_{пр}$, $q_{ан}$), силовые ($N_{пр}$, $N_{ан}$), скоростные ($v_{пр}$, $v_{ан}$), массовые ($m_{пр}$, $m_{ан}$) и другие характеристики двух геометрических подобных систем связаны между собой определенными зависимостями [9], например:

$$\begin{aligned} v_{пр}/v_{ан} &\approx A_{пр}/A_{ан} \approx \sqrt[3]{m_{пр}/m_{ан}} \approx \\ &\approx \sqrt[3]{N_{пр}/N_{ан}} \approx \sqrt[3]{q_{пр}/q_{ан}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где v , A , m , N , q — соответственно: скорость, линейный размер, масса, мощность и вместимость ковша проектируемого (_{пр}) экскаватора и экскаватора аналога (_{ан}).

Ниже приведена методика расчета основных параметров экскаватора с гидравлическим приводом.

Для определения массы проектируемого экскаватора используют зависимость, выведенную на основе теории подобия:

$$m = \frac{V}{V_{пр}} \cdot m_{пр}, \quad (2)$$

где m , $m_{пр}$ — массы проектируемого экскаватора и его прототипа, т; V , $V_{пр}$ — вместимость ковша проектируемого экскаватора и его прототипа, м³.

¹ Products for your profitability. URL: <http://engcon.com/en/our-products.html> (дата обращения: 07.01.2019).

Конструктивную схему экскаватора вычерчивают в соответствии с конструкцией экскаватора, принимаемого за прототип, в заданном рабочем положении (рис. 1).

Размер полубазы B экскаватора определяют по равенству, м:

$$B = 0,05\sqrt[3]{m}, \quad (3)$$

Параметры рабочего оборудования экскаватора, обозначенные на рис. 1, определяют из равенства:

$$A = K' \cdot B(1 \pm K_v), \quad (4)$$

где A — искомый размер, м; K' — коэффициент подобия; K_v — коэффициент вариации, принимают по табл. 1.

Компьютерное моделирование с последующим расчетом псевдоферменного рабочего оборудования было осуществлено с применением программного продукта T-FLEX российского производства. Кинематические и основные геометрические размеры стрелы и рукояти взяты с рабочего оборудования стандартного исполнения экскаватора Hitachi ZX270. Общая типовая конструкция стрелы и рукояти балочного типа коробчатого исполнения, а также присоединительные размеры стрелы к поворотной платформе, стрелы к рукояти и рукояти к ковшу не менялись.

С учетом отсутствия подробных описаний подобных проработок, нами было проведено поэтапное моделирование, при котором конструкция рабочего оборудования моделировалась итерационным проведением прочностных расчетов. Получаемые результаты по напряжениям, деформациям и коэффициенту запаса служили основанием для последующего изменения конструкции. В качестве границы допускаемых напряжений было принято 400 МПа, соответствующее прочностным характеристикам широко распространенной в машиностроении стали марки 10ХСНД².

Лучшая визуализация напряженно-деформированного состояния обеспечивалась назначением высоких коэффициентов перемещений, что совместно с цветовым представлением распределения напряжений четко указывала наиболее неудачные конструктивные предложения.

Рабочее оборудование рассчитывалось для общепринятых схем нагружения, отраженных в различных методиках. В качестве характерных положений рабочего оборудования и режимов нагружения были установлены следующие шесть комбинаций:

² Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф., Жаров В.В., Колосков М.М. и др. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., переработ. и доп. М., 2014. 1216 с.

Рис. 1. Конструктивная схема гидравлического экскаватора

Fig. 1. Hydraulic excavator layout diagram

Табл. 1. Данные к определению параметров рабочего оборудования гидравлических экскаваторов

Table 1. The data for determining excavating part parameters of hydraulic excavators

Размер / Dimension description	Обозначение / Denotation	Коэффициент / Coefficient	
		K'	K_V
Длина рукояти / Dipper stick length	r_p	1,39	0,2
Длина стрелы / Jig boom length	r_c	3,62	0,15
Радиус ковша / Dipper radius	r_k	0,89	0,15
Высота пяты стрелы / Jig boom journal height	y_1	1,22	0,16
Расстояние от пяты стрелы до оси поворота экскаватора / Distance from jig boom journal to excavator swivel axis	x_0	–	–
Высота шарнира цилиндра стрелы / Jig boom cylinder pivot height	y_2	0,93	0,17
Расстояние от шарнира цилиндра стрелы до оси поворота экскаватора / Distance from jig boom cylinder pivot to excavator swivel axis	x_2	0,67	0,29
Расстояние от пяты стрелы до шарнира штока цилиндра стрелы / Distance from jig boom journal to jig boom cylinder rod pivot	l_1	1,5	0,15
Расстояние от шарнира штока цилиндра стрелы до шарнира поворота рукояти / Distance from jig boom cylinder rod pivot to dipper stick pivot	l_2	2,32	0,19
Длина консоли рукояти / Dipper stick cantilever length	l_3	0,49	0,38
Расстояние между шарнирами / Distance between pivots	l_4	0,24	0,27
То же » » / Ditto » »	l_5	0,35	0,24
То же » » / Ditto » »	l_5	0,35	0,26
То же » » / Ditto » »	l_6	0,35	0,26
Расстояние от пяты стрелы до шарнира цилиндра рукояти / Distance from jig boom journal to dipper stick cylinder pivot	l_8	2,34	0,21
Угол излома стрелы / Jig boom bend angle	Δf	2,38	–

- копание всей шириной ковша, рукоять максимально отвернута от стрелы;
- копание всей шириной ковша, рукоять перпендикулярна кинематической длине стрелы;
- копание одним зубом (имитация упора в препятствие), рукоять максимально отвернута от стрелы;
- копание одним зубом (имитация упора в препятствие), рукоять перпендикулярна кинематической длине стрелы;
- торможение рабочего оборудования при повороте на выгрузку, кинематическая длина стрелы горизонтальна, рукоять максимально отвернута от стрелы;
- торможение рабочего оборудования при повороте на выгрузку, кинематическая длина стрелы горизонтальна, рукоять перпендикулярна кинематической длине стрелы.

Расчет производился как для всего рабочего оборудования целиком, так и для рукояти отдельно. Последнее позволило более детально смоделировать конструкцию рукояти на более простой модели. Вычленение рукояти в отдельную расчетную схему является возможным, так как влияние массово геометрических параметров стрелы на рукоять ничтожно. При этом моделирование стрелы проводилось уже в совокупности с окончательно разработанной рукоятью, что существенно упрощает корректировку конструкции при итерационном моделировании.

В расчетах были приняты постоянными массы и центры масс гидроцилиндров и масса ковша с грунтом.

Принятое в расчетах максимальное усилие копания взято согласно техническим характеристикам экскаватора-прототипа и составляет 160 кН. Расчет составляющих сопротивления грунта копанию определены согласно общеприменимой методике³. Усилие, возникающее на ковше в условиях копания одним зубом, принято равным максимальному усилию копания, так как указанное соответствует настройкам вторичного предохранительного клапана гидроцилиндра поворота ковша.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета для некоторых положений показаны на рис. 2–5.

Компьютерное моделирование позволило получить конструкцию, удовлетворяющую условию допустимых напряжений. С учетом того, что псевдоферменная конструкция наиболее предпочтительна для рукояти, нежели для стрелы, именно в рукояти удалось обеспечить наибольшее облегчение. Так, если масса стрелы после модернизации была сни-

³ Шемякин С.А., Лецинский А.В. Расчет землеройных машин : уч. пос. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. 55 с.

жена с 2273 до 2242 кг, т. е. всего на 31 кг (чуть более 1 %), то для рукояти облегчение составило с 1150 до 1000 кг, то есть 150 кг (примерно 13 %). Таким образом, суммарный весовой выигрыш от псевдоферменного преобразования составил 5,5 %.

Моделирование показало, что модернизация рукояти, в отличие от стрелы, не встречает серьезных трудностей. Это является следствием того, что рукоять практически всегда находится под воздействием всех видов нагрузок, кроме момента, скручивающего конструкцию вокруг продольной оси. И в этом случае ферменная металлоконструкция достаточно хорошо сопротивляется внешнему воздействию. Скручивание встречается очень редко, либо при копании одной стороной ковша (упор в препятствие), либо при резком торможении экскаватора при его повороте, но с одновременным условием расположения ковша перпендикулярно рукояти. Но даже в этих случаях эффект от скручивания оказался минимальным, так как плечи действия сил скручивания малы. Тем не менее он ощутим, особенно за счет деформаций стрелы. Так максимальное напряжение в рукояти, моделируемой отдельно от стрелы (рис. 2), с допущением, что рукоять закреплена на абсолютно жесткой опоре, составило 353,3 МПа. А с учетом деформаций в стреле (рис. 4)

максимальные напряжения выросли до 389,5 МПа, поменяв локализацию.

Силы, скручивающие стрелу, не могут не учитываться при торможении на повороте. Инерционные силы от масс рукояти и, особенно, заполненного грунтом ковша действуют на значительных удалениях от оси скручивания стрелы. В результате этого, возникающие крутящие моменты разрушительны для псевдоферменной конструкции стрелы. И сохранение ее целостности и формы требует дополнительных усиления металлоконструкции. Этим и объясняется отмеченный выше однопроцентный массовый эффект от проведенной модернизации.

Моделирование показало, что скручивание металлоконструкции стрелы наибольшим образом проявляется в головной части стрелы и практически не сказывается в корневой ее части. Это связано с наличием двух гидроцилиндров подъема-опускания стрелы, которые практически полностью воспринимают на себя скручивающий момент, ограничивая зону его действия от оголовка стрелы до крепления гидроцилиндров. Поэтому псевдоферменная конструкция стрелы достаточно легко реализуется на участке от гидроцилиндров стрелы до пяты стрелы. Однако, с учетом того, что этот участок у большинства стрел меньше половины общей длины, подобная модерни-

Рис. 2. Результаты предварительного компьютерного моделирования рукояти: копание одним зубом, рукоять максимально отвернута от стрелы

Fig. 2. Results of dipper stick preliminary computer simulation: single-tooth excavating, dipper stick is turned away from jig boom through maximal angle

Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования рабочего оборудования: копание всей шириной ковша, рукоять максимально отвернута от стрелы

Fig. 3. Results of excavating part computer simulation: entire dipper width excavating, dipper stick is turned away from jig boom through maximal angle

Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования рабочего оборудования: копание одним зубом, рукоять перпендикулярна кинематической длине стрелы

Fig. 4. Results of excavating part computer simulation: single-tooth excavating, dipper stick is perpendicular to jig boom kinematic length

Задача_1 [Прочность]
Напряжения эквивалентные, МПа
Масштаб перемещений 5,07

Problem_1 [Strength]
Equivalent stress, MPa
Displacement scale is of 5.07

Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования рабочего оборудования: копание одним зубом, рукоять максимально отвернута от стрелы

Fig. 5. Results of operational equipment computer simulation: single-tooth excavating, dipper stick is turned away from jig boom through maximal angle

зация стрелы малоэффективна, что и подтверждается вышеуказанным облегчением в 1 %.

Моделирование также показало, что для псевдоферменного оборудования экскаватора вполне подходит сталь 10ХСНД, однако с целью дальнейшего облегчения целесообразным будет применение стали с большими прочностными характеристиками, типа стали 18Г2АФД. Применение стали типа S550MC, S600MC, S700MC, MAGSTRONG W600QL, MAGSTRONG W700⁴ возможно только при реализации необходимых технологических мер при сварке (в силу высокого углеродного эквивалента указанных сталей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненная работа позволяет сделать следующие выводы и дать рекомендации:

⁴ Прокат высокопрочных марок стали. URL: http://www.mmk.ru/for_buyers/65558/ (дата обращения: 07.01.2019).

1. Псевдоферменная конструкция облегчила рабочее оборудование на 5,5 %, а собственно рукоять — на 13 %.

2. Сталь 10ХСНД полностью удовлетворяет типовому режиму работы машины. В случае адаптации экскаватора для работы на более прочных грунтах рекомендуемой сталью является 18Г2АФД.

3. Разработанная псевдоферменная конструкция может быть рекомендована как основа для дальнейшей модернизации, в том числе для работы с рабочими органами ударного (гидромолоты) и циклического (фрезы, вибраторы) действия.

4. Дальнейшее облегчение конструкции возможно за счет установки перегородок/ребер жесткости, которые несущественно повлияют на массу, но могут привести к радикальному снижению напряжений в металлоконструкции.

5. Необходим детальный анализ работы металлоконструкции в условиях многоциклового усталости, особенно в режиме ударного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмара Л.А., Дахно О.А. Тенденции развития рабочего оборудования гидравлических экскаваторов с изменяемыми геометрическими параметрами // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : сб. тр. Международной науч.-

трами // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : сб. тр. Международной науч.-

практ. конф / ред. В.В. Минин. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2016. С. 343–356.

2. Мусиенко О.М., Веремеенко Д.В. Экскаватор с поворотной рукоятью // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : сб. тр., Белгород, 1–30 мая 2015. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 813–815.

3. Смоляницкий Э.А., Грузинов В.Д., Максимова Е.А. Вращающая рукоять для рабочего оборудования манипуляторов, экскаваторов, погрузчиков и других машин-орудий // Строительные и дорожные машины. 2007. № 8. С. 7.

4. Хмара Л.А., Дахно О.И. Оптимизация процесса копания грунта одноковшовым экскаватором с телескопическим рабочим оборудованием // Строительные и дорожные машины. 2017. № 4. С. 12–20.

5. Густов Д.Ю., Якушев С.Е. Влияние работы гидромолота на динамику одноковшового экскаватора // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 6. С. 7–13.

6. Гончаренко Д.Ф., Меленцов Н.А., Константинов А.С. Технология демонтажных и строительно-монтажных работ при восстановлении частично разрушенного здания // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2013. № 1. С. 42–44.

7. Боровский Б., Лапина Е. Техногенные аварии в системах газоснабжения и их предупреждение // Motrol. 2009. № 11А. С. 120–122.

8. Зотов О.А., Гоева Е.М. Модернизация металлоконструкции рабочего оборудования экскаватора // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы : мат. XXII Московской междунар. межвузов. науч.-техн. конф. студ., маг., асп. и мол. уч. В 2-х т. Т. 1. М. : МАДИ, 2018. С. 143–144.

9. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М. : Мир, 1990. С. 35–40.

10. Роговенко Т.Н., Зайцева М.М. Оценка оптимального значения вероятности безотказной работы деталей машин, на примере рукояти одноковшового экскаватора // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 84. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3848

11. Роговенко Т.Н., Зайцева М.М., Копылов Ф.С., Крымский В.С. Выбор оптимального варианта рукояти экскаватора с позиции теории принятия решений // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 102. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_135_rogovenko_zaitseva.pdf_792c497e51.pdf

12. Rogovenko T.N., Zaitseva M.M. Small-sample evaluation of dipper stick service life // Engineering Studies. 2017. Vol. 9. Issue 3 (2). Pp. 522–529.

13. Uzer C.C. Shape optimization of an excavator boom by using genetic algorithm : master of science dissertation thesis. The graduate school of natural and

applied sciences of middle east technical university. 2008. 109 p.

14. Luigi Solazzi. Design of aluminium boom and arm for an excavator // Journal of Terramechanics. 2010. Vol. 47. Issue 4. Pp. 201–207. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.03.002

15. Гурко А.Г. Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2011. № 55. С. 79–89.

16. Даненова Г.Т., Ахметжанов Т.Б. Компьютерное моделирование конструктивных параметров рукояти экскаватора // Инновации в технологиях и образовании : сб. X Междунар. науч.-практ. конф. 17–18 марта 2017 г. Белово ; Велико-Тырново ; Шумен : Изд-во филиала КузГТУ Изд-во университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», 2017. С. 66–69.

17. Великанов В.С., Исмаилов К.В., Савельев В.И., Габитов И.А. Программная реализация расчета ресурса рукояти экскаватора // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 12 (56). С. 351–354.

18. Komiya K., Soga K., Akagi H., Hagiwara T., Bolton M.D. Finite element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine // Soils and Foundations. 1999. Vol. 39. Issue 3. Pp. 37–52. DOI: 10.3208/sandf.39.3_37

19. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. Finite element method. V. 1. It's Basis & Fundamentals. London : Butterworth-Heinemann, 2006.

20. Huebner K.H., Dewhirst D.L., Smith D.E., Byrom T.G. The finite element method for engineers. New York; Toronto : John Wiley & Sons, Inc., 2001.

21. Кулешов А.В., Слепченко В.А., Слепченко И.В. Оптимизация металлоконструкций исполнительного органа гидравлического экскаватора в среде САПР // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2 (61). С. 204–210.

22. Dhawale R., Wagh S. Finite element analysis of components of excavator arm — a review // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2014. Vol. 3 (2). Pp. 341–346.

23. Вернези Н.Л. Метод оценки прочности металла неразрушающим способом с использованием априорной информации // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898

24. Makhutov N.A. A criterion base for assessment of strength, lifetime, reliability, survivability, and security of machines and man-machine systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2013. Vol. 42. Issue 5. Pp. 364–373. DOI: 10.3103/S1052618813050075

25. Севрюгина Н.С., Прохорова Е.В. Оценка параметров совместимости унифицированных элементов дорожных машин // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в

промышленности строительных материалов (XIX научные чтения) : междунар. науч.-практ. конф., 5–8 октября 2010 г. Белгород, Белгород : Белгородский государственный технологический университет, 2010. С. 201–208.

26. Севрюгина Н.С., Прохорова Е.В., Волков Е.А. Выбор и обоснование параметров быстросъемного соединительного устройства рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Белгород : Изд-во БГТУ им В.Г. Шухова, 2014. 109 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2018 г.

Принята в доработанном виде 15 января 2019 г.

Одобрена для публикации 25 февраля 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Зотов Олег Александрович — инженер, Пневмакс, 141400, г. Химки, Коммунальный пр., вл. 30, Zotov@Pneumax.ru;

Густов Дмитрий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, GustovDU@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Khmara L.A., Dachno O.A. Tendencies of development of the working equipment of hydraulic excavators with variable geometrical parameters. *Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for economic growth of the state : proceedings International scientific and practical conference / ed. V.V. Minin*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2016; 343–356. (rus.).
2. Musienko O.M., Veremeenko D.V. Excavator with rotary handle. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU V.G. Shukhov : proceedings, Belgorod, 1–30 may 2015*. Belgorod, Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov Publ., 2015; 813–815. (rus.).
3. Smolyanitsky E.A., Gruzinov V.D., Maksimova E. The rotating handle for the working equipment of manipulators, excavators, loaders and other machine tools. *Construction and road machines*. 2007; 8:7. (rus.).
4. Khmara L.A., Dachno O.I. Optimization of the soil digging process with a single-bucket excavator with telescopic working equipment. *Construction and road machines*. 2017; 4:12–20. (rus.).
5. Gustov D.Yu., Yakushev S.E. Influence of work of a hydrohammer on dynamics of the single-bucket excavator. *Automation and modern technology*. 2007; 6:7–13. (rus.).
6. Goncharenko D.F., Melentsov N.A., Konstantinov A.S. The technology of dismantling and construction works at restoration of partially destroyed building. *Industrial construction and engineering structures*. 2013; 1:42–44. (rus.).
7. Borovsky B., Lapina E. Man-made accidents in gas supply systems and their prevention. *Motrol*. 2009; 11A:120–122. (rus.).
8. Zotov O., Goeva E.M. Modernization of the metal working equipment of the excavator. *Lifting and transport, construction, road, track machines and robotic systems : proceedings XXII Moscow international interuniversity scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists*. In 2 v. Vol. 1. Moscow, MADI Publ., 2018; 143–144. (rus.).
9. Mushik Je., Mjuller P. *Methods of making technical decisions*. Moscow, Mir Publ., 1990; 35–40. (rus.).
10. Rogovenko T.N., Zaitseva M.M. Evaluation of the optimum value of probability of failure of machine parts for example the handle shovel. *Engineering Bulletin of the Don*. 2016; 4(43):84. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3848 (rus.).
11. Rogovenko T.N., Zaitseva M.M., Kopylov V.S., Krymsky V.S. Selection of the optimal variant of the excavator handle from the position of the theory of decision-making. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017; 4(47):102. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_135_rogoenko_zaitseva.pdf_792c497e51.pdf (rus.).
12. Rogovenko T.N., Zaitseva M.M. Small-sample evaluation of dipper stick service life. *Engineering Studies*. 2017; 9(3)(2):522–529.
13. Uzer C.C. Shape optimization of an excavator boom by using genetic algorithm. *Master of Science Dissertation Thesis. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*. 2008; 109.
14. Luigi Solazzi. Design of aluminium boom and arm for an excavator. *Journal of Terramechanics*. 2010; 47(4):201–207. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.03.002
15. Gurko A. Mathematical model of backhoe shovel manipulator. *Bulletin of Kharkiv national automobile and road University*. 2011; 55:79–89. (rus.).
16. Danova G.T., Akhmetzhanov T.B. Computer-aided design of the excavator's handle. *Innovations in*

technology and education : proceedings IX International scientific and practical conference. March 17–18, 2017. Belovo, Veliko Tarnovo, Shumen, Publishing house of the branch KuzGTU University publishing house «St. Cyril and St. Methodius», 2017; 66–69. (rus.).

17. Velikanov V.S., Ismagilov K.V., Savel'ev V.I., Gabitov I.A. The implementation of the resource calculation of the excavator handle. *Modern Scientific Research and Innovation*. 2015; 12(56):351–354. (rus.).

18. Komiya K., Soga K., Akagi H., Hagiwara T., Bolton M.D. Finite element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine. *Soils and Foundations*. 1999; 39(3):37–52. DOI: 10.3208/sandf.39.3_37

19. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *Finite element method. V. 1. It's Basis & fundamentals*. London, Butterworth-Heinemann Publ., 2006.

20. Huebner K.H., Dewhirst D.L., Smith D.E., Byrom T.G.. *The finite element method for engineers*. New York; Toronto, John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2001.

21. Kuleshov A.V., Slepchenko V.A., Slepchenko I.V. Computer-aided design of hydraulic excavator implements. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 2(61):204–210. (rus.).

22. Dhawale R., Wagh S. Finite element analysis of components of excavator arm — A review. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2014; 3(2):341–346.

23. Vernesi N.L. The method of estimation of durability of metal with a non-destructive method using a priori information. *Engineering journal of Don*. 2013; 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898 (rus.).

24. Makhutov N.A. A criterion base for assessment of strength, lifetime, reliability, survivability, and security of machines and man-machine systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013; 42(5):364–373. DOI: 10.3103/S1052618813050075

25. Sevryugina N.S., Prohorova E.V. Evaluation of compatibility parameters of unified elements of road machines. *Research, nanosystems and resource-saving technologies in the industry of building materials (XIX nauchnye chteniya) : International Scientific and Practical Conference, October 5–8, 2010*. Belgorod, Belgorod State Technological University, 2010; 201–208. (rus.).

26. Sevryugina N.S., Prohorova E.V., Volkov E.A. *Selection and justification of parameters of the quick coupling device of the working equipment of the single-bucket excavator*. Belgorod, Izd-vo BGTU im. V.G. Shuhova Publ., 2014; 109. (rus.).

Received December 19, 2018.

Adopted in a modified form January 15, 2019.

Approved for publication February 25, 2019.

ABOUT THE AUTHORS: **Oleg A. Zotov** — engineer, **Pneumax**, 30 vlad., Communal proezd, Khimki, 141400, Russian Federation, Zotov@Pneumax.ru;

Dmitriy Yu. Gustov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Construction Mechanization, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, GustovDU@mgsu.ru.