

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.879.3

*ИВАНЕНКО МАЙЯ БОРИСОВНА, магистрант,  
slamay@mail.ru*

*АНАНИН ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
avg@tsuab.ru*

*СЛЕПЧЕНКО ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
vldslp@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОЧЛЕНЕННОЙ СТРЕЛЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА**

В статье затронуты вопросы оптимизации металлоконструкций канатных экскаваторов с сочлененной стрелой. Рассмотрены этапы оптимизации стрелы экскаватора. В исследовании использовалась система автоматизированного проектирования АПИМ WinMachine. Представлены промежуточные результаты оптимизации в виде карты распределения эквивалентных напряжений и графика зависимости эквивалентных напряжений конструкции от угла установки нижней секции стрелы. Даны рекомендации по углу установки нижней секции стрелы экскаватора с целью снижения максимальных напряжений.

**Ключевые слова:** карьерный канатный экскаватор; оптимизация металлоконструкции; метод конечных элементов; сочлененная стрела; оптимальный угол установки.

*MAIYA B. IVANENKO, Undergraduate Student,  
slamay@mail.ru*

*VLADIMIR G. ANANIN, DSc, Professor,  
avg@tsuab.ru*

*VLADIMIR A. SLEPCHENKO, PhD, A/Professor,  
vldslp@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## **STRESS-STRAIN STATE OF COMPOUND BOOM OF DRAGLINE EXCAVATOR**

The paper deals with the problem of optimization of steel structures of dragline excavators with compound boom. The stages of excavator boom optimization are considered. A comput-

er-aided design system WinMachine is used for these investigations. The intermediate results of the experiment are represented by the allocation map of equivalent stress distribution and their dependence on the installation angle of installation of the bottom boom section. Recommendations are given for the angle of installation of the bottom boom section to reduce maximum stresses.

**Keywords:** dragline excavator; optimization design; finite element method; compound boom; optimum angle of installation.

Оптимизацией конструкций строительных и дорожных машин приходится заниматься рано или поздно. Причиной выступают проблемы надежности машин, повышение эргономических требований, желание увеличить производительность без потерь ресурса и многое другое. Особенную остроту приобретают такие вопросы при проектировании и эксплуатации тяжелых и сверхтяжелых машин [1, 2], т. к. малейший выигрыш в отдельном направлении оптимизации дает значительный долговременный эффект.

Отдельно рассматривая класс экскаваторов для вскрышных работ и добычи полезных ископаемых, можно выделить экскаваторы с прямой лопатой с канатным управлением. Данные машины хорошо известны и достаточно распространены. Хотя в последнее время их вытесняют экскаваторы с гидравлическим приводом рабочего оборудования, тем не менее, в условиях сурового северного или очень жаркого тропического климата канатные экскаваторы имеют ряд преимуществ. Это меньшая чувствительность электромеханических приводов к перепаду температур и влажностей по сравнению с гидроприводами. Практически отсутствуют проблемы с запуском механизмов при значительных отрицательных температурах, большие межремонтные циклы и ресурс оборудования. Кроме этого, наша страна имеет значительный парк канатных экскаваторов и отлаженную инфраструктуру по ремонту и обслуживанию данных машин. В свете изложенного, актуальность совершенствования канатных экскаваторов очевидна.

Патентный поиск решений и конструкций, связанных с данной тематикой, позволил вычлениить направление приложения усилий. Анализ результатов поиска выявил нечеткость рекомендаций выбора геометрических параметров сочлененных двухсекционных стрел канатных экскаваторов. Ряд патентов по конструкциям сочлененных стрел (например, [3] и [4]) принадлежит ООО «ИЗ-КАРТЭКС» – отечественному производителю канатных экскаваторов, входящему в ОАО «Ижорские заводы». Так, в заявке на изобретение [4] предлагается установить нижнюю секцию стрелы канатного экскаватора под углом к горизонту не менее  $45^\circ$ , а верхнюю секцию относительно нижней секции под углом, отличным от  $0^\circ$ .

Поэтому были рассмотрены рабочие органы канатных экскаваторов с целью формирования рекомендаций по назначению оптимальных геометрических параметров на примере сочлененной двухсекционной стрелы экскаватора ЭКГ-15 (рис. 1, а).

Оптимизация основных геометрических параметров сочлененной стрелы должна вестись поэтапно. Сначала определяются оптимальные углы установки от горизонтали верхней и нижней секций стрелы, затем определяются оптимальные соотношения длин этих секций между собой и на заключительном этапе оп-

тимизируются поперечные сечения металлоконструкций. Критерием оптимизации является минимизация эквивалентных напряжений в сечениях элементов конструкций [5, 6], а также увеличение производительности машины в целом.

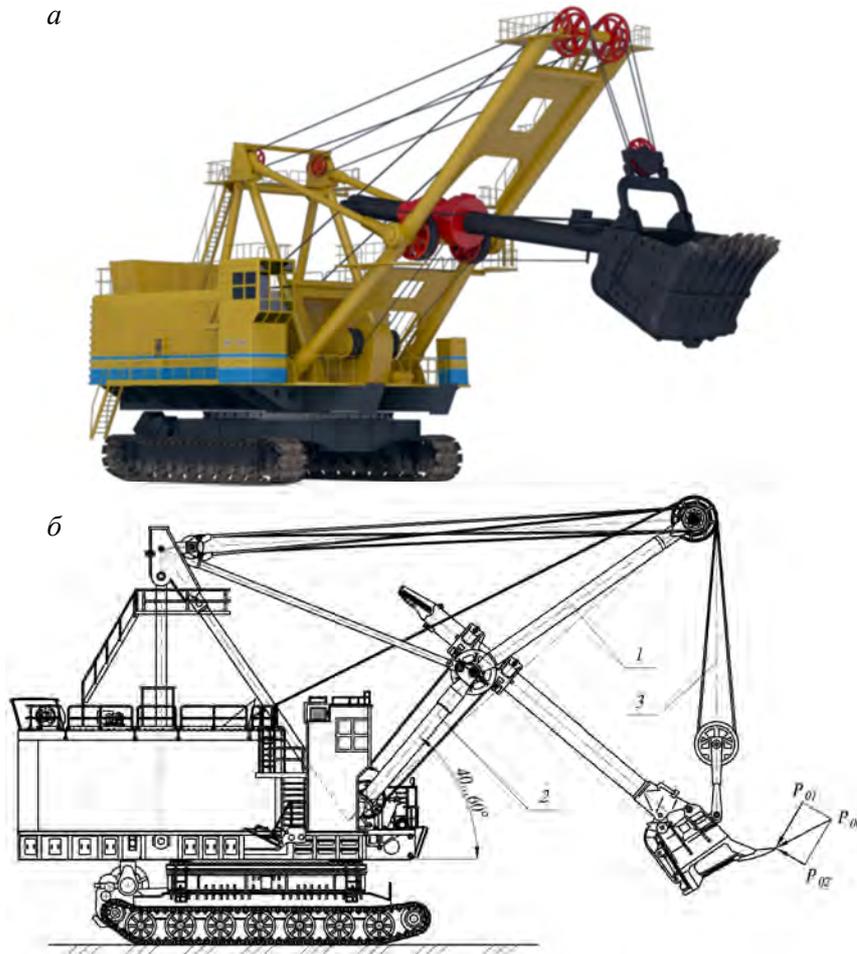


Рис. 1. Карьерный одноковшовый экскаватор с канатным управлением ЭКГ-15

Сейчас нами ведется первый этап оптимизации конструкции. Промежуточным результатом данной работы являются рекомендации по выбору оптимального угла установки нижней секции стрелы экскаватора ЭКГ-15 (рис. 1, б).

Рассмотрен диапазон углов от 40 до 60° установки нижней секции стрелы 2 (рис. 1, б) от горизонтали при неизменном положении верхней секции стрелы с углом в 35° от горизонтали 1 (рис. 1, б). За расчетную нагрузку были приняты максимальное тяговое усилие подъемной лебедки 1300 кН и сила тяжести грунта в ковше 400 кН. Эти нагрузки и все массовые характеристики взяты по данным производителя.

Исследование проводилось с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) APM WinMachine в модуле WinStructure3D [5]. Этот

модуль САПР применяет метод конечных элементов, т. е., вся конструкция представлена набором конечных элементов (узел, стержень и пластина) [8–10].

Необходимые узлы фиксировались в пространстве для создания опор конструкции путем наложения ограничений степеней свободы [5, 7]. Все активные силы и массовые характеристики, действующие со стороны напорного механизма и рукояти с ковшом, были заменены реактивными силами на оголовке стрелы и напорном валу в шарнире состыковки верхней и нижней секций стрелы экскаватора (рис. 2, а).

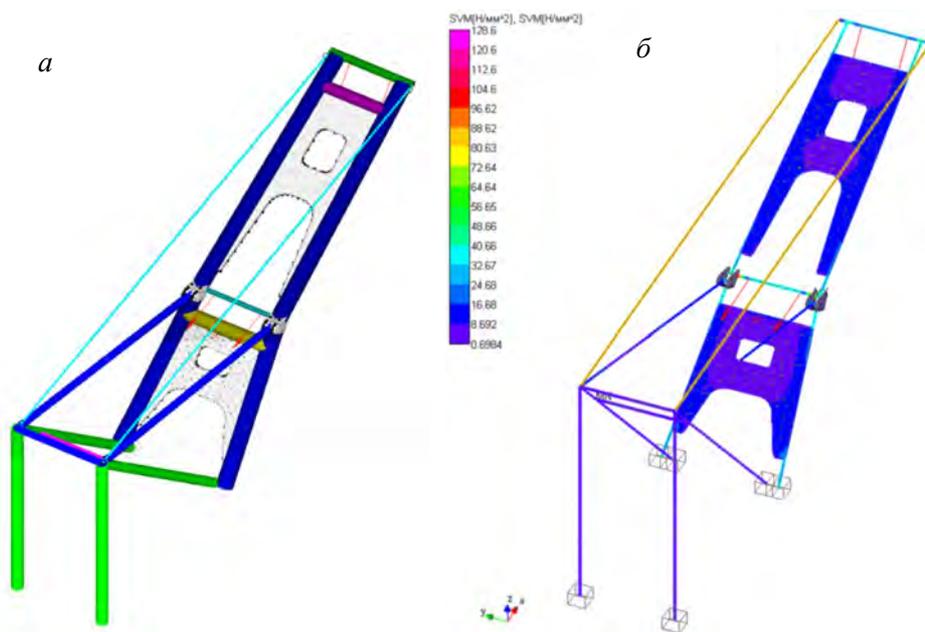


Рис. 2. Расчетная схема конструкции при различных этапах расчета в APM WinMachine: а – 3D-модель; б – типичное распределение эквивалентных напряжений

Рассматривались четыре расчетных положения рукояти с ковшом относительно стрелы:

- 1) начало копания – рукоять вертикальна, зубья ковша на уровне стоянки экскаватора;
- 2) рукоять находится на максимальном вылете, ось 3 (рис. 1, б) каната подъема ковша вертикальна;
- 3) режущая кромка зубьев ковша поднята на высоту расположения оси напорного вала, при этом канат подъема ковша вертикален;
- 4) режущая кромка зубьев ковша поднята на высоту расположения напорного вала, рукоять максимально выдвинута.

Результатом прочностных расчетов в САПР стало распределение эквивалентных напряжений в элементах рабочего оборудования экскаватора, а также карта распределения коэффициента запаса прочности. Типичный вид 3D-модели и распределения эквивалентных напряжений представлен на рис. 2.

После обработки расчетных данных на основании рекомендаций [11] были получены графические зависимости максимальных эквивалентных напряжений в элементах рабочего оборудования экскаватора от угла установки нижней секции стрелы. Графическая зависимость (рис. 3) строилась для каждого из четырех расчетных положений, представленных выше.

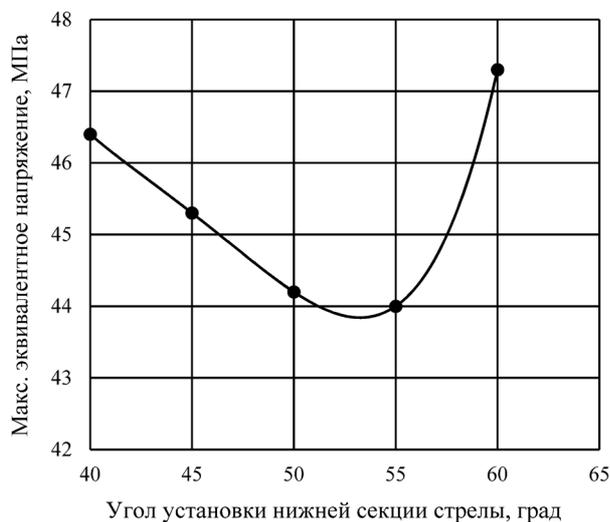


Рис. 3. Графическая зависимость максимальных эквивалентных напряжений от угла установки нижней секции стрелы для третьего расчетного положения

Анализ зависимости максимальных эквивалентных напряжений от угла установки нижней секции стрелы для всех расчетных положений показывает, что график зависимости носит экстремальный характер с явно выраженным минимумом, который находится в диапазоне угла установки нижней секции стрелы 50–53°. Уровень максимальных напряжений в металлоконструкции нижней секции стрелы при этом падает на 6 %. Результат исследования показывает наличие значимого эффекта и правильность выбранного направления оптимизации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананин, В.Г. Исследования динамики нагружения рабочего оборудования карьерного экскаватора в среде APM WinMachine / В.Г. Ананин // Механизация строительства. – 2013. – № 4 (826). – С. 45–50.
2. Ананин, В.Г. Моделирование рабочего оборудования карьерного экскаватора с механическим приводом и анализ его напряженного состояния в среде APM WinMachine / В.Г. Ананин // Сапр и графика. – 2004. – № 4. – 22 с.
3. Пат. RU2455427C2 МПК E02F 3/30 (2006.01). Способ разработки горно-добычного забоя и карьерный канатный экскаватор для его осуществления / Немировский П.И., Донской В.М.; заявитель и правообладатель ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова». – 2010128846/03; заявл. 12.07.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 2. – 9 с.
4. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора: заявка на изобретение RU 2008 144 212 А МПК E02F 3/30 (2006.01) / Сапожников А.И., Орлов И.А., Мельников Д.А., Хорев С.Б.; заявитель ООО «ИЗ-КАРТЭКС»; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13. – 1 с.

5. *The Finite element method for engineers* / K.H. Huebner, D.L. Dewhurst, D.E. Smith, T.G. Byrom. – New York; Toronto : John Wiley & Sons, Inc., 2001.
6. *Qureshi, J.H.* The Finite Element Analysis of Boom of Backhoe Loader / J.H. Qureshi, M. Sagar // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. – 2012.
7. *Замрий, А.А.* Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure 3D / А.А. Замрий. – М. : Изд-во АИПМ, 2010. – 375 с.
8. *Zienkiewicz, O.C.* Finite Element Method. V. 1. It's Basis & Fundamentals / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu. – London : Butterworth Heinemann, 2006.
9. *Zienkiewicz, O.C.* Finite Element Method. V. 2. For Solid and Structural Mechanics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – London : Butterworth Heinemann, 2006
10. *Zienkiewicz, O.C.* Finite Element Method. V. 3. For Fluid Dynamics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, P. Nithiarasu. – London : Butterworth Heinemann, 2006.
11. *Rombach, G.A.* Finite element design of concrete structures: Practical problems and their solutions / G.A. Rombach. – London : Thomas Telford Publishing, 2004.

## REFERENCES

1. *Ananin V.G.* Issledovaniya dinamiki nagruzeniya rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora v srede ARM WinMachine [Dynamic loading of dragline excavator equipment modeled by WinMachine WS]. *Mechanization in Construction*. 2013. No 4 (826). Pp. 45–50. (rus)
2. *Ananin V.G.* Modelirovanie rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora s mekhanicheskim privodom i analiz ego napryazhennogo sostoyaniya v srede ARM WinMachine [Modeling of dragline excavator equipment with mechanical drive and stress-strain analysis using WinMachine WS]. Moscow : SAPR i grafika, 2004. No 4. P. 22. (rus)
3. *Nemirovskii P.I., Donskoi V.M.* Sposob razrabotki gornodobychnogo zaboya i kar'ernyi kanatnyi ekskavator dlya ego osushchestvleniya [A mining method and dragline excavator for its implementation]. Pat. Rus. Fed. N 2455427C2, 2012, Bul. No. 2. 9 p. (rus)
4. *Sapozhnikov A.I., Orlov I.A., Mel'nikov D.A., Khorev P.B.* Rabochee oborudovanie odnokovshovogo ekskavatora [Shovel equipment]. Patent application N 2008 144 212 A 2010 Bul. No. 13. 1 p. (rus)
5. *Huebner K.H., Dewhurst D.L., Smith D.E., Byrom T.G.* The finite element method for engineers. New York; Toronto : John Wiley & Sons, Inc., 2001.
6. *Qureshi J.H., Sagar M.* The finite element analysis of boom of backhoe loader. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012.
7. *Zamrii A.A.* Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov v srede ARM Structure 3D [Design and finite element analysis using WS Structure 3D]. Moscow : APM Publ., 2010. 375 p. (rus)
8. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.* Finite element method. V. 1. It's basis & fundamentals. London : Butterworth Heinemann, 2006.
9. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.* Finite element method. V. 2. For solid and structural mechanics. London : Butterworth Heinemann, 2006.
10. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Nithiarasu P.* Finite element method. V.3. For fluid dynamics. London : Butterworth Heinemann, 2006.
11. *Rombach G.A.* Finite element design of concrete structures: Practical problems and their solutions. London : Thomas Telford Publishing, 2004.