

УДК 630\*36.001.6

**С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский, С. П. Мохов**  
Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
И МОДЕРНИЗАЦИЯ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ФОРВАРДЕРА  
«АМКОДОР-2662»**

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния несущей конструкции форвардера «Амкодор-2662» при выполнении технологических операций. Разработана конечно-элементная модель шарнира сочленения полурам форвардера. На основе конечно элементной модели и предварительно выполненной оценки возникающих нагрузочных режимов получены зависимости изменения напряженного состояния, даны рекомендации по изменению параметров несущей конструкции. В процессе проведения исследования применялись методы математического моделирования динамики лесных машин, конечно-элементного моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкций.

Исходными данными для моделирования явились геометрические и массовые характеристики форвардера «Амкодор-2662», силовые, упругие и демпфирующие свойства его составных частей. Для исследования динамической нагруженности шарнира использована предварительно разработанная математическая модель. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов шарнирного сочленения полурам производилось с использованием программного пакета конечно-элементного моделирования Ansys 12.

В качестве модернизации конструкции шарнирного сочленения рассмотрена возможность установки болтов соединения фланца трубы с конструкцией вертикального шарнира с большего диаметра. Проанализирован эффект от увеличения радиуса скругления галтели трубы горизонтального шарнира. Рассмотрена возможность исключения из конструкции упорной шайбы. Установлено, что такое изменение позволит уменьшить величину безопорного зазора путем перемещения переднего подшипника ближе к оси вертикального шарнира и снизить эквивалентные напряжения в зоне их концентрации.

**Ключевые слова:** лесная машина, форвардер, несущая конструкция, напряженное состояние, нагрузка, конечные элементы, моделирование.

**S. A. Golyakevich, A. R. Goronovsky, S. P. Mohov**  
Belarusian State Technological University

**EXAMINATION OF STRESS STRAIN STATE AND MODERNIZATION  
OF THE BEARING STRUCTURE OF FORWARDER AMKODOR-2662**

The work is devoted to the study of stress-strain state of the bearing structure of forwarder Amkodor-2662 while doing technological operations. The finite element model of the hinge joint semiframes of forwarder is developed. Based on the finite element model and preformed assessing of the implications of loading modes the dependences of changes in the stress state are obtained the recommendations to modify the structure are given. In the course of the study the methods of mathematical modeling of the forest machines dynamics, finite element modeling, and analysis of the stress-strain state of metal structures were applied.

The initial modeling data were the geometrical and massive characteristics of forwarder Amkodor-2662, power, elastic and damping properties of its components. To study the dynamic loading of the hinge the preliminary, developed mathematical model was used. Finite element modeling of the stress-strain state of the elements of frames hinge joint was performed using the software package of the finite element modeling Ansys 12.

As modernization of construction of hinge joint the install action possibility of bolts of flange connection of pipe with vertical hinge structure with bigger diameter. The effect of radius increasing of curvature of the pipe horizontal fillet joint was analyzed. The possibility of the construction whitout the thrust washer was considered. It has been established that this change will reduce the amount of unsupported gap by moving the front bearing closer to the axis of the vertical hinge and will lower equivalent stresses in their concentration area.

**Key words:** forest machine, forwarder, supporting structure, state of stress, load, finite element, modeling.

**Введение.** Важнейшим условием эффективной эксплуатации машин является обеспечение их безотказной работы. Эксплуатация отечественных форвардеров выявила ряд не-

достатков, касающихся надежности их несущих конструкций. Согласно статистическим данным, с потерей прочности несущей конструкции связано около 15–20% их эксплуатационных

отказов. Ремонт несущей конструкции форвардера в условиях лесосеки затруднителен и требует транспортировки машины в специализированные мастерские, что приводит к длительным простоям в работе, невыполнению плановых показателей предприятия и значительным экономическим потерям [1, 2]. С целью повышения надежности отечественных форвардеров «Амкодор-2662» были проведены исследования нагруженности и напряженно-деформированного состояния их несущей конструкции.

**Основная часть.** Анализируемым элементом несущей конструкции форвардера выступал шарнир сочленения полурам (рис. 1).

Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния [3, 4] элементов шарнирного сочленения полурам производилось с использованием программного пакета конечно-элементного моделирования Ansys 12.

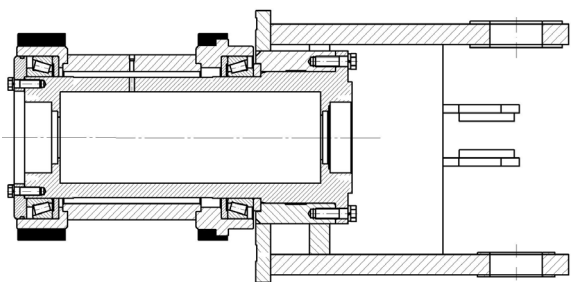


Рис. 1. Конструкция шарнира сочленения полурам

Для исследования динамической нагруженности шарнира использована предварительно разработанная математическая модель [5, 6]. Исходными данными для моделирования явились геометрические и массовые характеристики форвардера Амкодор-2662, силовые, упругие и демпфирующие свойства его составных частей.

По результатам моделирования были отобраны 3 наиболее тяжелых режима нагружения (таблица). Первый режим соответствует кососимметричному преодолению передним колесом груженого форвардера (масса пачки – 14 т, длина – 4 м) единичной неровности высотой 0,2 м при начальной скорости движения 0,83 м/с.

Второй режим нагружения соответствует случаю разгрузки первой пачки сортиментов манипулятором, при перпендикулярном его положению относительно продольной оси форвардера и вылете 5 м. При этом масса разгружаемой пачки составляет 1367 кг, а замедление при торможении манипулятора у поверхности штабеля – 2,5 м/с<sup>2</sup>.

Третий режим нагружения возникает при разгрузке последней пачки сортиментов массой 987 кг при вылете манипулятора 6,2 м. Прочие

характеристики режима нагружения соответствуют второму расчетному случаю.

Предварительный анализ несущих элементов конструкции шарнира позволил выявить следующие особенности ее нагружения. Упорное кольцо переднего подшипника не воспринимает вертикальные нагрузки, в результате чего между внутренней обоймой подшипника и упорной кромкой трубы образуется безопорный зазор. При этом со стороны сжатия (для рассмотренных режимов – в верхней части трубы) происходит прижатие опорного кольца к нижней обойме подшипника (рис. 1).

Выбранная схема установки подшипников способствует передаче горизонтального усилия на опору. Такая работа сопряжения учтена при моделировании его напряженно-деформированного состояния (НДС). Крутящий момент в конструкции шарнира передается только на участке между осью вертикального шарнира и опорами гидроцилиндров блокировки сочленения полурам. Для оценки НДС болтового соединения трубы горизонтального шарнира и сварной конструкции вертикального шарнира выполнено моделирование предварительной затяжки 16 болтов крепления. С учетом особенностей сопряжения энергетической и технологической части вертикального шарнира выполнено его нагружение расчетными нагрузками (рис. 2).

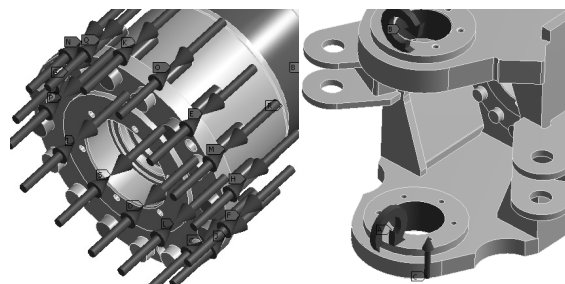


Рис. 2. Моделирование предварительного натяжения болтов и распределение действующих нагрузок

При формировании нагрузок учтено изменение направления действия вертикальной реакции и изгибающего момента в месте их приложения при деформации шарнира относительно продольной горизонтальной оси на расчетные углы, полученные с использованием модели.

Усилия затяжки предварительно рассчитаны на основании стандартных моментов затяжки согласно конструкторской документации.

Для повышения точности проводимых расчетов при формировании конечно-элементной сетки использованы тороидальные элементы, средний размер грани которых составлял 0,01 м (рис. 3). В местах концентрации напряжений выполнено уменьшение сетки.

**Режимы нагружения, напряженно-деформированное состояние и эквивалентное напряжение в элементах шарнирного сочленения полурам форвардера «Амкодор-2662»**

№ п. п.	Нагрузки на шарнир			Деталь шарнира	Общий вид напряженного состояния элемента шарнира	Величина расчетных эквивалентных напряжений, МПа
	$M_{кр}$ , кН·м	$M_{изг}$ , кН·м	$R_v$ , кН			
1	0	109,6	48,9	Труба горизонтального шарнира в месте установки переднего подшипника (в нижней части)		382
				Участок трубы горизонтального шарнира между подшипниками (в нижней части)		105
				Наиболее нагруженный болт соединения горизонтального и вертикального шарнира (в верхней части)		483
				Нижняя опорная пластина вертикального шарнира		124
2	23,3	99,1	44,3	Труба горизонтального шарнира в месте установки переднего подшипника (в нижней части)		273
				Участок трубы горизонтального шарнира между подшипниками (в нижней части)		78
				Наиболее нагруженный болт соединения горизонтального и вертикального шарнира (в верхней части)		367
				Нижняя опорная пластина вертикального шарнира		93
3	32,7	59,4	22,1	Труба горизонтального шарнира в месте установки переднего подшипника (в нижней части)		185
				Участок трубы горизонтального шарнира между подшипниками (в нижней части)		44
				Наиболее нагруженный болт соединения горизонтального и вертикального шарнира (в верхней части)		219
				Нижняя опорная пластина вертикального шарнира		48

Для болтовых соединений учтено фрикционное контактное взаимодействие головок болтов с трубой горизонтального шарнира. Коэффициент трения принят равным 0,6. Взаимодействие сварной конструкции вертикального шарнира с трубой горизонтального шарнира принято бесфрикционным. При этом в качестве допущения принято, что зазор меж-

ду данными деталями отсутствует. Его наличие способно вызвать повышение напряжений в местах крепления болтов и должно исследоваться отдельно.

Моделирование НДС деталей и сопряжений на указанных режимах позволило установить значения действующих в них максимальных эквивалентных напряжений (таблица).

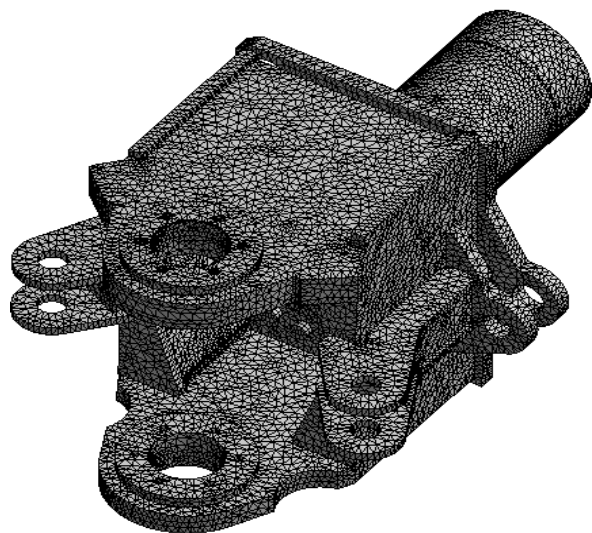


Рис. 3. Размещение конечно-элементной сетки на поверхности шарнира сочленения полурам

Болтовые соединения трубы горизонтального шарнира со сварной конструкцией вертикального шарнира напряжены неравномерно. Наибольшие эквивалентные напряжения возникают на 5 верхних болтах. При этом на режиме разгрузочных работ, проводимых мани-

пулятором форвардера, нагрузка на все болты распределена более равномерно, что объясняется одинаковым восприятием ими действующего крутящего момента.

**Заключение.** В качестве модернизации конструкции шарнирного сочленения следует рассмотреть возможность установки 3 верхних болтов соединения фланца трубы с конструкцией вертикального шарнира с большим диаметром. Следует увеличить радиус скругления галтели трубы горизонтального шарнира не менее чем до 8 мм. При этом в сочетании с увеличенной толщиной стенки трубы будет обеспечена усталостная долговечность детали не менее  $7,5 \cdot 10^5$  циклов нагружения по режиму 1 (таблица) при уровне доверительной вероятности 0,9.

С целью снижения напряжений на участке галтели горизонтального шарнира следует рассмотреть возможность исключения из конструкции упорной шайбы. Такое изменение позволит уменьшить величину безопорного зазора путем перемещения переднего подшипника ближе к оси вертикального шарнира и снижению эквивалентных напряжений в зоне их концентрации.

### Литература

1. Golyakevich S., Goronovsky A. Workload estimation of harvesters during the operations of work cycle // *Transport*. Issue 28 (3). Vilnius, 2013, pp. 323–330.
2. Анализ тенденций развития конструкций многооперационных лесозаготовительных машин / С. П. Мохов [и др.] // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 18–20.
3. Wideen A. Forwarder frame technical report. Articulated Frame // MF2011 – Systems engineering School of Industrial Eng. and Management. [Electronic resource]. Mode of access: [http://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.183103!/Menu/general/column-content/attachment/Frame\\_Report2011.pdf](http://www.kth.se/polopoly_fs/1.183103!/Menu/general/column-content/attachment/Frame_Report2011.pdf) (date of access: 26.05.2012).
4. Heinze A. Modelling, simulation and control of a hydraulic crane: submitted for the Degree of Master of Science in Automotive Mechatronics. Växjö, 2007. 135 p.
5. Голякевич С. А. Повышение надежности несущих конструкций многооперационных лесных машин выбором режимов работы на основе энергетического потенциала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск., 2013. 27 с.
6. Голякевич С. А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 72–78.

### References

1. Golyakevich S., Goronovsky A. Workload estimation of harvesters during the operations of work cycle. *Transport*. Issue 28 (3). Vilnius, 2013, pp. 323–330.
2. S. P. Mokhov [i dr.] Analysis of trends designs multioperational logging machines. *Trudy BGTU. Lesnaja i derevoobrab. prom-st'* [Proceedings of BSTU. Forest and Woodworking Industry]. 2012, no. 2, pp. 18–20 (in Russian).
3. Wideen A. Forwarder frame technical report. Articulated Frame MF2011 – Systems engineering School of Industrial Eng. and Management. Available at [http://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.183103!/Menu/general/column-content/attachment/Frame\\_Report2011.pdf](http://www.kth.se/polopoly_fs/1.183103!/Menu/general/column-content/attachment/Frame_Report2011.pdf). (date of access: 26.05.2012).
4. Heinze A. Modelling, simulation and control of a hydraulic crane: submitted for the Degree of Master of Science in Automotive Mechatronics. Växjö, 2007. 135 p.
5. Goljakevich S. A. *Povyshenie nadezhnosti nesushihh konstrukcij mnogooperacionnyh lesnyh mashin vyborom rezhimov raboty na osnove jenergeticheskogo potenciala: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk* [Improving the reliability of load-bearing structures multioperation forest machine operating mode selection based on the energy potential: abstract of thesis Ph. D. Engineering]. Minsk, 2013. 27 p.

6. Goljakevich S. A. Analysis of operational models multioperational logging machines. *Trudy BGTU. Lesnaja i derevoobrab. prom-st'* [Proceedings of BSTU. Forest and Woodworking Industry]. 2013, no. 2, pp. 72–78 (in Russian).

#### Информация об авторах

**Голякевич Сергей Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

**Гороновский Андрей Романович** – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок, проректор по воспитательной работе. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

**Мохов Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by

#### Information about the authors

**Golyakevich Sergey Aleksandrovich** – Ph. D. Engineering, senior lecturer, Department of Forestry Machinery and Logging Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

**Goronovsky Andrey Romanovich** – Ph. D. Engineering, assistant professor, Department of Forestry Machinery and Logging Technology, Vice-rector for educational work. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: arg@belstu.by

**Mohov Sergey Petrovich** – Ph. D. Engineering, assistant professor, head of Department of Forestry Machinery and Logging Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by

*Поступила 20.02.2015*