Сведения об источнике

Отзыв

Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems

Годы охвата Scopus: от 2009 до 2015, от 2017 до 2018

Издатель: Institute of Advanced Scientific Research

ISSN: 1943-023X

Отрасль знаний: Engineering: General Engineering | Computer Science: General Computer Science

Просмотреть все документы | Настроить оповещение о документе | Journal Homepage

Перейти на сайт показателей журн

CiteScore 2017
0.19

SJR 2017
0.114

SNIP 2017
0.135

CiteScore | CiteScore рейтинг и тренды | Содержание Scopus

CiteScore 2017

Вычислено с использованием данных из 30 April, 2018

$$0.19 = \frac{\text{Количество цитирований 2017}}{\text{Документы с 2014 - 2016*}} = \frac{\text{Цитат: 11}}{\text{58 документов}}$$

* Показатель CiteScore включает все доступные типы документов

Просмотр методики CiteScore | Часто задаваемые вопросы о CiteScore

CiteScoreTracker 2018

Дата последнего обновления *07 January, 2019*
Ежемесячное обновление

$$0.20 = \frac{\text{Количество цитирований 2018}}{\text{Документы с 2015 - 2017}} = \frac{\text{227 цитирований на текущую дату}}{\text{1 109 документов на текущую дату}}$$

Отмеченные этим значком параметры составлены в соответствии со стандартом Snowball Metrics, отражающим взаимодействие промышленности и научной среды.

Рейтинг CiteScore

Категория	Ре
Engineering General Engineering	#22
Computer Science General Computer Science	#18

Просмотр трендов CiteScore | Добавить CiteScore на с

Special Issue

12-Special Issue, 2018

Guest Editor(s):

Table of Contents

Comparative Study of Flexural Member with Steel Reinforcement and Partial Bamboo Reinforcement

Authors: S. Karthik and Dr.P. Rama Mohan Rao
Abstract Purchase this Article

Pages: 1655-1662

A Formal Analysis of Secure HCTE Routing Mechanism Using Ea-Heed and MCSO

Authors: J. Krishnadas and Dr.P. Manimegalai
Abstract Purchase this Article

Pages: 1663-1676

Application of PASO Algorithm in Cross-Domain Web Page Recommendation Systems (PASO-CDWPRSS)

Authors: R. Manikandan and V. Saravanan
Abstract Purchase this Article

Pages: 1677-1687

On the Selection of the Method for Solving the Problem of External Acoustics of an Altitude Propeller

Authors: Ilya Davydov, Aleksandr Leontev, Vladimir Kozhevnikov and Yuri Boldyrev
Abstract Purchase this Article

Pages: 1688-1694

Recommendations for Improving the Accuracy of Virtual Testing

Authors: Daria Egorova, Kirill Ivanov, Dmitrii Lebedev and Svetlana Nikulina
Abstract Purchase this Article

Pages: 1695-1703

Sign In

Username

Password

Login

Quick Links

- Home
- Table of Contents
- Special Issues

Scopus SJR

Journal of Advanced Research in Dynamical and...

Q4 Computer Science (miscellaneous)

best quartile

SJR 2017

0.11

powered by scimagojr.com

Recommendations for Improving the Accuracy of Virtual Testing

Daria Egorova, Kirill Ivanov, Dmitrii Lebedev and Svetlana Nikulina

Abstract:

This article is to investigate the virtual passive safety tests on the tractor cabin using the LS-DYNA software. Samples used in lab testing were St3ps grade carbon steel, and the results of testing were put to build a mathematical model of this material. Criteria for the quality of the finite element mesh and a technology have been developed for better accuracy of the virtual testing of tractors for passive safety. Data from virtual testing was compared with the in-sute findings.

Issue: 12-Special Issue

Year: 2018

Pages: 1695-1703

Purchase this Article

Sign In

Username

Password

Login

Quick Links

- Home
- Table of Contents
- Special Issues

Scopus SJR

Journal of Advanced Research in Dynamical and...

Q4 Computer Science (miscellaneous)

best quartile

SJR 2017

0.11

powered by scimagojr.com

Recommendations for Improving the Accuracy of Virtual Testing

Daria Egorova, Engineer, Institute of Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, Polytechnicheskaya. E-mail:d4rynaegorova@yandex.ru*

Kirill Ivanov, Candidate of Technical SCIENCES, Lead Engineer, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, Polytechnicheskaya.

Dmitrii Lebedev, Head of Department, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, Polytechnicheskaya.

Svetlana Nikulina, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, Polytechnicheskaya.

Abstract--- This article is to investigate the virtual passive safety tests on the tractor cabin using the LS-DYNA software. Samples used in lab testing were St3ps grade carbon steel, and the results of testing were put to build a mathematical model of this material. Criteria for the quality of the finite element mesh and a technology have been developed for better accuracy of the virtual testing of tractors for passive safety. Data from virtual testing was compared with the in-sute findings.

Keywords--- Passive safety, agricultural machinery, mathematical model, Falling Object Protective Structure (FOPS), Roll Over Protection Structure (ROPS), strength, dynamic design, finite element (FE) model.

I. Introduction

Progress in computer simulation made it possible to explore the passive safety of machines virtually, based on the finite element method. A lot of papers have already been devoted to this matter, like (Wang, Yang & Yu, 2009), (Blanco, Martin &Ortalda, 2016) and (Zhao, Zhang & Yang, 2014), for example. The first paper in the list is a nonlinear static analysis of the FE model of a two-post safety frame under side load. By comparing virtual and in-sute data, material displays same behavior between cases. In (Blanco, Martin &Ortalda, 2016), protective structure in a state when load is applied until the prescribed absorption energy is reached. The paper also provides a series of falling object tests. Virtual testing of a structure under load provides valuable information about its effectiveness, and, as a result, the ability to improve critical areas. In (Zhao, Zhang & Yang, 2014), similar virtual ROPS tests were touched, but on materials used to protect the cabin of a truck. Static load application was imitated using the ABAQUS software package. The results revealed that the tested protective structure met the requirements. The cab sustained the applied load and was considered as a protection for the operator. By calculation, safety frame of the ROPS was a real and safe system that can go in a heavy duty dump truck.

This article provides results of more complex dynamic tests performed on tractors for passive safety of thereof, and results of mechanical tests of steel samples, which were used to build a mathematical model of said material. Virtual findings were compared with those from in-sute testing on a test bench, which vertical stiffness was as in the actual cab construction. The stress-strain behavior of ROPS, obtained in previous tests, was included in the article. This somehow improved the accuracy of calculations.

As indicated in (Jerončič, 2015), a tractor cab must meet the generally accepted European standard in the field of passive safety: FOPS (Falling Object Protective Structure) (ISO 3449:2005) and ROPS (Roll Over Protection Structure) (ISO 3471:2008). A FOPS structure is to reduce the severity of a traffic accident, to protect the operator from possible falling objects, while ROPS safety frame is to ensure the safety of an operator when the special equipment rolls over.

This article is to carry out FOPS and ROPS tests using modern approaches of computer engineering, as well as to develop recommendations for improving the accuracy of virtual testing:

- Material samples underwent lab testing, which results were put to build a mathematical model;
- Criteria were developed for the quality of a FE mesh;
- Technology was developed for including data on stress-strain behavior of the cabin, obtained in previous calculations.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

II. Material Model Building

When it comes to the process of modeling object collisions, plastic effects of material from which the objects are made are essential. By using the *MAT_JOHNSON_COOK feature, one can consider a high rate of deflection and a high impact speed (LS-DYNA, 2001). Therefore, this material model is most suitable for calculating the cab protection frames (FOPS, ROPS) on condition that it was selected and validated by following the in-sute data. According to this model, effective stress is calculated by the following formula:

$$\sigma = \left(a + b\varepsilon_p^n\right)\left(1 + c\ln\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

Where: σ – stress; ε_p – plastic deflection; a, b, n, c, ε and ε_0 – model's parameters;T – temperature.

Samples used in lab testing were St3ps grade carbon steel as the most popular material used in the manufacture of cab frames and load-carrying units of agricultural machinery. Samples of standard sizes were cut from this material (Figure 1). Three samples were tested to validate testing results.

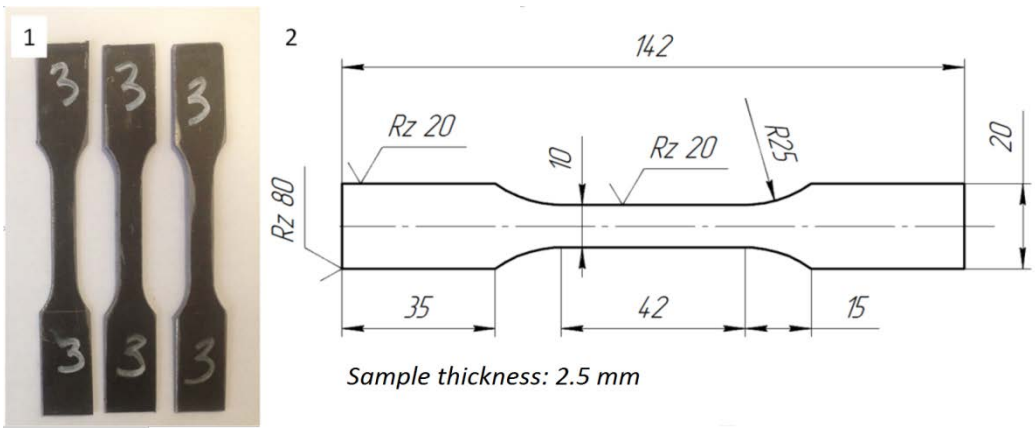


Figure 1: Standard Size Samples: 1 – for in-sute testing, 2 – a schematic view

Chemical composition of the St3ps grade carbon steel in presented in Table 1.

Table 1: Chemical Composition of Material used in Tested Samples

Grade	Mass Fraction of Chemical Elements		
	carbon	manganese	silicon
St3ps	0.14…0.22	0.40…0.65	0.05…0.15

In-sute testing of material samples was carried out on a certified experimental testing machine, which was recording stress and deflections (Figure 2).

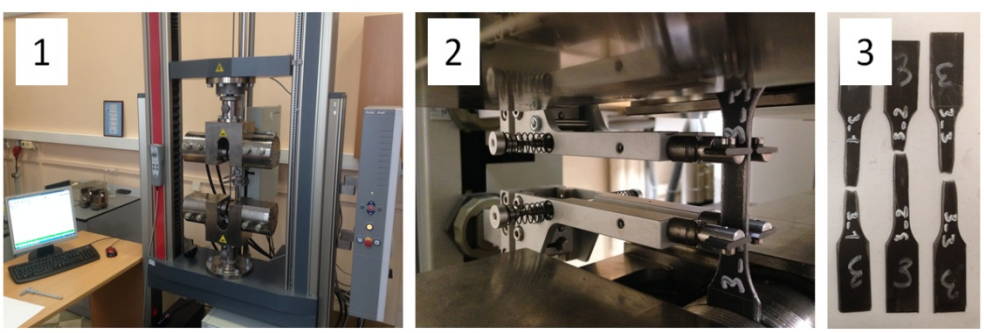


Figure 2: Experimental Testing Machine (1, 2) and Standard Size Test Samples after Testing (3)

Stress data that were obtained in relation to deflections, detected in three test samples, were averaged and transferred from engineering units (Figure 3) to the true ones by:

$$\delta = \ln(\varepsilon + 1), \quad (2)$$

$$S = \sigma(\varepsilon + 1), \quad (3)$$

Where: δ – true deflection; ε – engineering deflection; S – true stress; σ – engineering stress.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

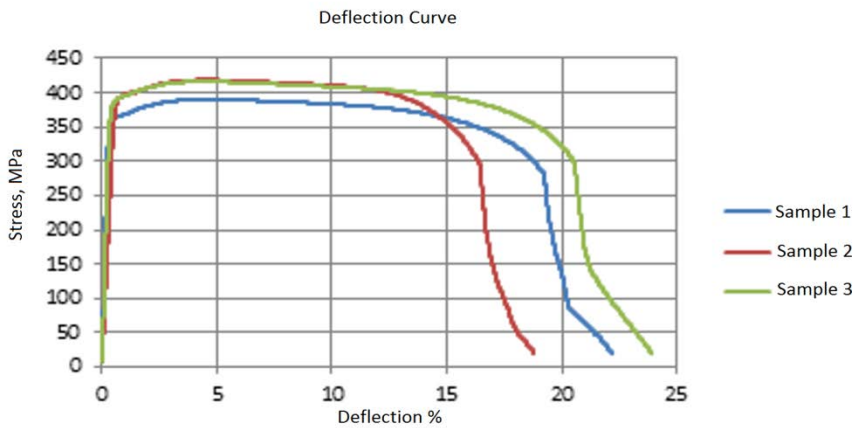


Figure 3: Engineering Deflection Curve by Measurement

As a result, deflection curve is presented in a form in which it can be used in virtual passive safety testing, performed using the finite element method (Figure 4) (Borovkov, Burdakov&Klyavin, 2012).

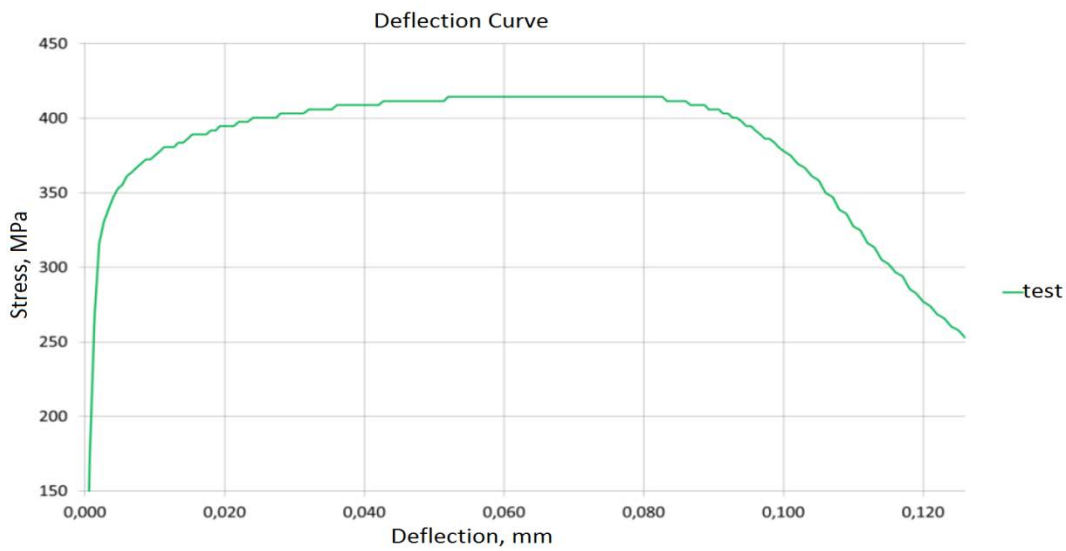


Figure 4: True Deflection Curve, Averaged

III. Calculation Technology and FE Mesh Quality Criteria

Virtual testing, which is the imitation of the in-sute testing, is performed to reduce the cost and the time for manufacturing a tractor cabin. According to ISO 3471: 2008, ROPS testing includes four tests (longitudinal loading, side loading, front crushing and rear crushing). Tests are performed sequentially on a single ROPS. That is, the last three tests are conducted when the ROPS is already deformed and has a certain level of residual stress. In virtual testing, this factor is usually not considered, so the testing is likely to be carried out on an initial FE model, but this has an adverse effect on the accuracy of calculations.

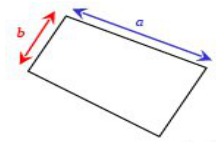
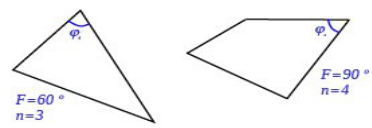
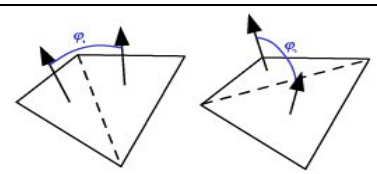
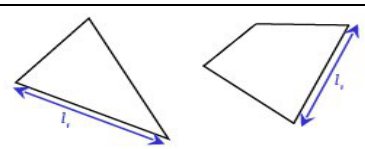
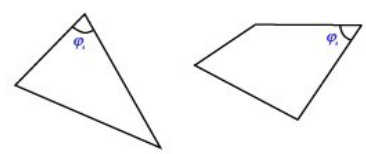
For better accuracy of virtual ROPS testing, a corresponding computer program was designed (Lebedev et al., 2017), which provides:

- Automatic loading of files containing data on the previous simulation case;
- Calculation of energy absorbed by the ROPS during virtual tests plus the target value of this energy;
- File containing necessary data for the next stage of testing.

The quality of a model splitting into finite elements significantly affects the calculation results. Table 2 shows the recommended requirements for finite elements, which are to minimize the calculation error.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

Table 2: FE Mesh Quality Criteria

№	Criterion	Value	Description
1	Aspect ratio	4	 Aspect ratio $= \max\left(\frac{a}{b}\right)$
2	Skewness	125	 Skew angle $= \sum_{1}^{n} \lvert F - \varphi_i \rvert$
3	Warping	15	 Warping Angle $= \max(\phi_1, \varphi_2)$
4	Min Length	4	 Minimum length $= \min(l_i)$ Maximum length $= \max(l_i)$
5	Max Length	15	See point 4
6	Min Angle Quads	40	 Angle $= F_{min} < \varphi_i < F_{max}$
7	Max Angle Quads	140	See point 6
8	Min Angle Trials	30	See point 6
9	Max Angle Trials	120	See point 6
10	Triangles, %	10	TrianglesvsQuads

IV. Virtual FOPS/ROPS Testing

4.1 FOPS Testing

ISO 3449:2005 is a document that specifies the FOPS tests (ISO 3449:2005). In laboratory conditions, these tests are carried out by dropping a standard object (indenter) of a given shape and mass from a certain height.

Level I impact protection: impact strength for protection from small falling objects (e.g. bricks, small concrete blocks, hand tools) encountered in operations such as highway maintenance, landscaping and other construction site services.

Level II impact protection: impact strength for protection from heavy falling objects (e.g. trees, rocks) for machines involved in site clearing, overhead demolition or forestry.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

According to ISO 3449:2005, testing is performed for two cases: when a 45-kg indenter falls from a height of 3.1 m and when an indenter weighing 227 kg falls from a height of 5.22 m. Since the second case is more dangerous, then it will be our case of choice. Figure 5 shows the position of an indenter for the test. Testing was done with a DLV (deflection limiting volume) in the cab, imitating the presence of an operator. In-sute testing was performed on a similar construction.

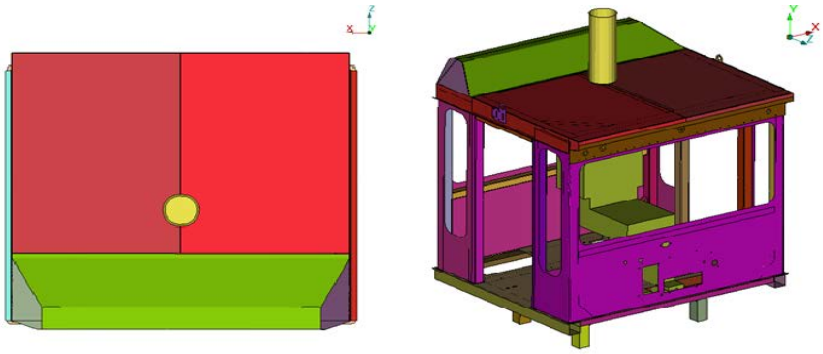


Figure 5: Position of Indenter for FOPS Testing

In this case, maximum deflection of the cabin roof was 106 mm (Figure 6).

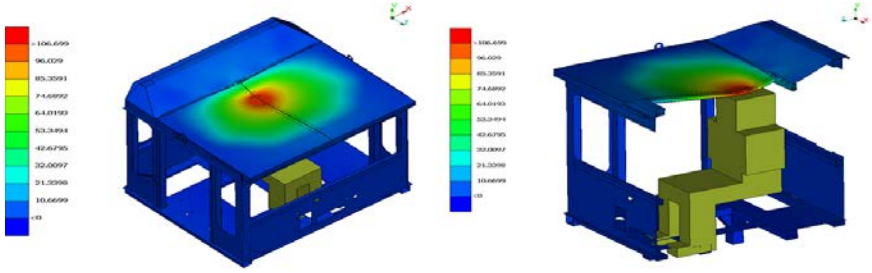


Figure 6: Total Deflections Caused by an Impact, mm.

A 227-kg indenter, applied to the roof of the cab from a height of 5.22 m, hit it at the point located above the operator's head, and made the protective structure to infringe on the clearance zone by about 7 mm. Thus, the central roof beam was strengthened. Second testing indicated a 12 mm decrease in deflection.

4.2 Rops Testing

Virtual testing was carried out in accordance with (ISO 3471:2008). In laboratory conditions, ROPS strength is checked by applying static force and by static compression tests simulating loads that can affect the ROPS when the tractor rolls back, forward or sideways without falling. Tests allow assessing the strength of the unit itself, its attachments, and parts of the tractor to which the load will pass from the ROPS.

According to ISO 3471:2008, there are several cases of impact applied to the tractor cab to consider. Figures 7, 8, and 9 are the load application schemes for five cases.

In virtual testing, we used data on stress-strain behavior of ROPS, obtained in previous tests.

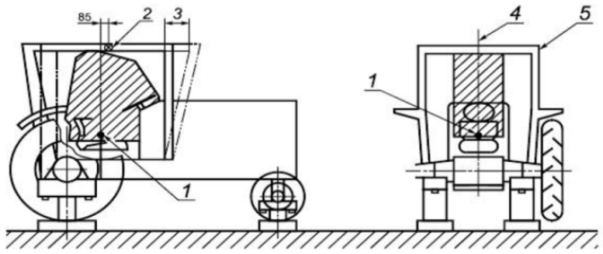


Figure 7: Side Load Application, where 1 – Seat Index Point (SIP); 2 – Point of Side Load Application; 3 – Deflection due to Rear Loading; 4 - Longitudinal Axis; 5 – Side Load

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

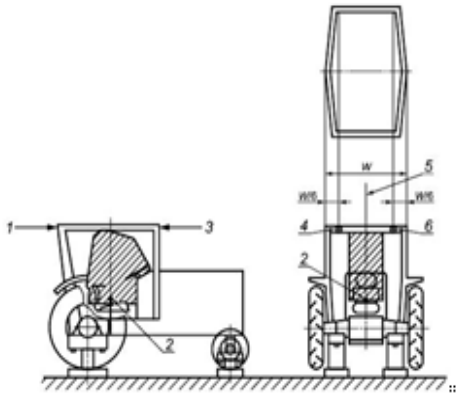


Figure 8: Load Application, Rear and Front, where 1 – Rear Load; 2 – SIP; 3 – Front Load; 4 – Point of Second Load Application, Front or Rear; 5 – Longitudinal Axis; 6 – Point of Load Application, Rear or Front.

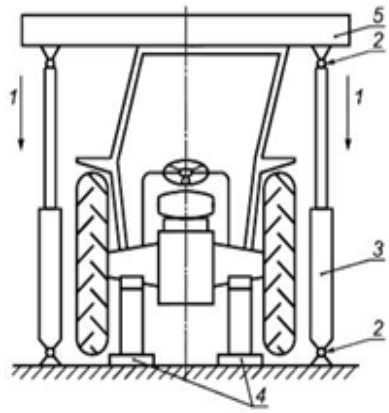


Figure 9: Example of Arrangement fir Crushing Test, where 1 – Load; 2 – Universal Pin Joints; 3 – Hydraulic Cylinder; 4 – Blocks under Front and Rear Axles; 5 – Crushing Beam

There were five virtual ROPS tests conducted in the following sequence:

- Longitudinal loading, load application scheme in Figure 7.
- Front crushing, first test, load application scheme in Figure 8.
- Side loading, load application scheme in Figure 9.
- Rear crushing, second test, load application scheme in Figure 8.

Additionally, longitudinal strength test was carried out, as the axle load distribution was 50 × 50. The load application scheme is presented in Figure 7.

The linearly increasing load applied to the tractor cab by means of a stiff beam (640×110 mm) was distributed uniformly. Loading was stopped when the energy absorbed by the protective structure reached:

$$E_{il1} = 1{,}4m_t ,$$

Where: m_t - calculated mass of a tractor, 23000 kg.

Figures 10-14 show total deflections and von-Mises stress at various load applications, data are true for the point when required absorption energy was reached.

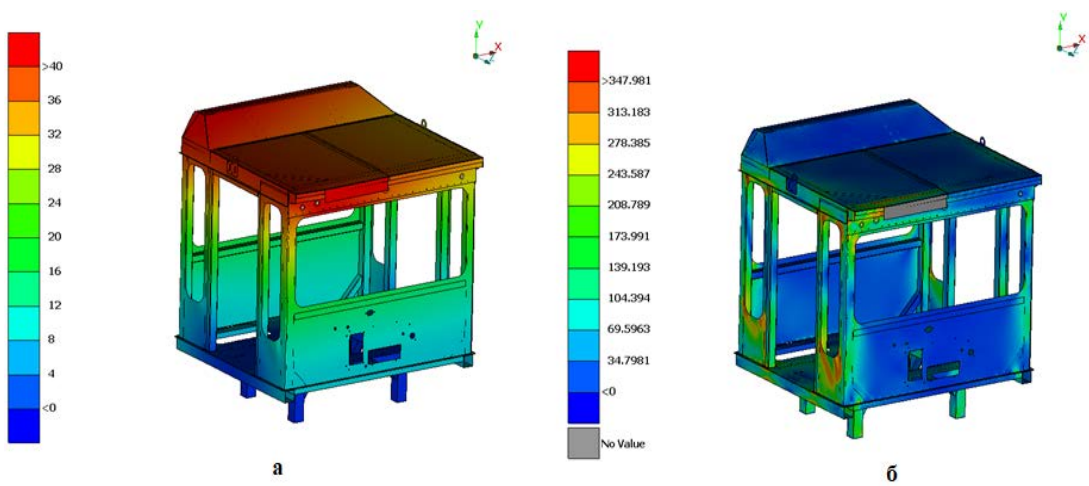


Figure 10: Longitudinal Loading Test: Tractor Cab at Impact from the Front: a – total deflections, mm; b – von-Mises stress, MPa

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

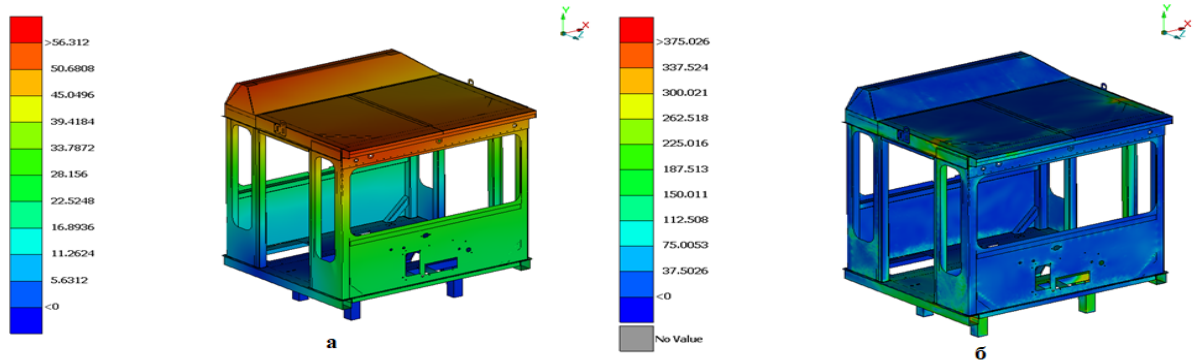


Figure 11: First Crushing Test: Crushing at the Front: a – Total Deflections, mm; b – von-Mises Stress, MPa

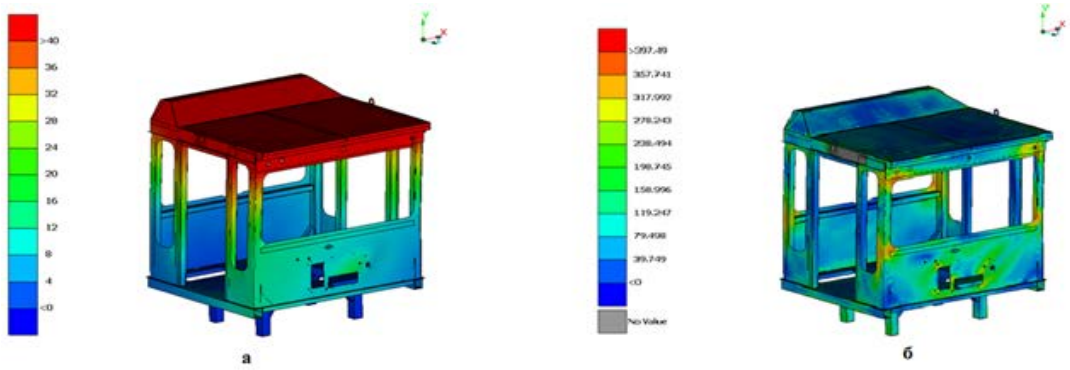


Figure 12.Side Loading Test: Horizontal Impact:a – Total Deflections, mm; b – von-Mises Stress, MPa

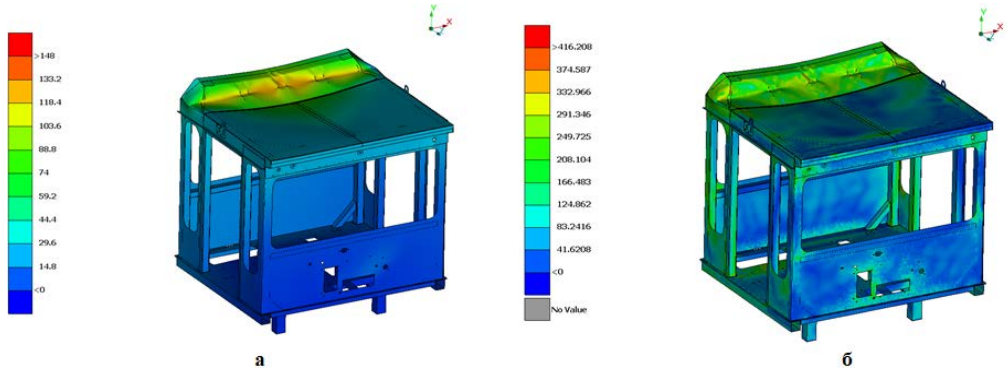


Figure 13: Second Crushing Test: Crushing at the Rear:a – Total Deflections, mm; b – Von-Mises Stress, MPa

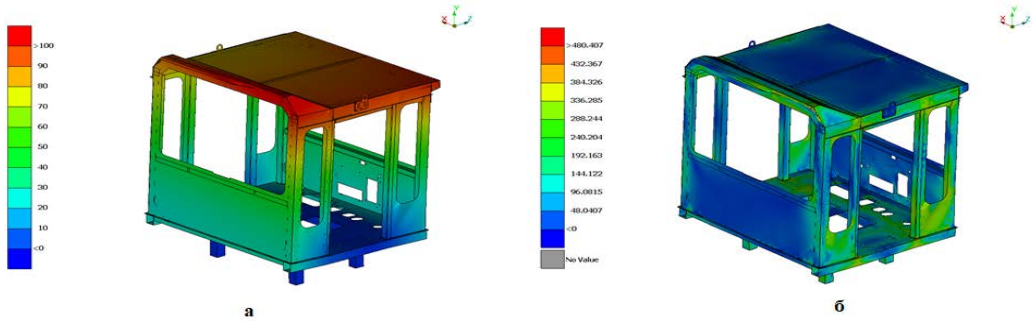


Figure 14: Longitudinal Loading Test: Tractor Cab at Impact from the Rear: a – total deflections, mm; b – von-Mises stress, MPa

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

V. Data from Virtual Testing VS in-SUTE Findings

The testing laboratory specializing in mechanical equipment and transport carried out a series of certified FOPS and ROPS tests on a cab frame (UDM2 Petra-FTZ Manufacturer). The procedure complies with ISO 3449: 2005, Level II (Figure 15).

Figure 15: An Assembly View of Protective Structure (Cab Frame): a) at Impact; b) Subsequent to Impact

Table 3: Provides Comparative Testing Data

Table 3: Comparative Findings in In-Sute and Virtual Testing

Case	Virtual Testing, mm	In-Sute Testing, mm	Error, %
FOPS, LevelII	90.28	88.16	2.40
ROPS, longitudinal loading	44.55	45.20	1.40
ROPS, first crushing at the front	56.23	59.11	4.87
ROPS, side loading	40.45	42.50	4.82
ROPS, second crushing at the rear	148.60	146.90	1.15
ROPS, longitudinal loading	65.51	67.74	3.29

VI. Conclusions

One can make virtual results comparable to experimental data only if the material model was chosen right, if the geometry is accurately modeled and calculations are fine, if the mesh is good, and the previous stress-strain behavior of the structure is considered. This article presents testing results, which are as close as possible to the results of in-sute tests, which indicates the adequacy of initial assumptions. The calculation error is below 5%, so computer modeling can provide the most optimal, durable and safe design. This will allow reducing the number of in-sute tests to perform.

Acknowledgments

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the Federal Program "Research and Development in the Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technical Complex for 2014-2020", Activity 1.3., Subsidy Agreement **№ 14.578.21.0206** of 03.10 .2016. Unique project identifier: **RFMEFI57816X0206.**

References

[1] Blanco, D. H., Martin, C. and Ortalda, A. Virtual FOPS and ROPS Testing on Agricultural Tractors. According to OECD Standard Code 4 and 10. *Proc. Of 14th International LS-DYNA Users Conference*, 2016, 1-21.

[2] Borovkov, A. I., Burdakov, S. F. and Klyavin, O. I. *Computer engineering. CSR North-West*, 2012.

[3] GOST 380-2005 Carbon steel of ordinary quality, 8.

[4] ISO 3449:2005 Earth-moving machinery - Falling-object protective structures - Laboratory tests and performance requirements.

[5] ISO 3471:2008 Earth-moving machinery - Roll-over protection structure - Laboratory tests and performance requirements.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

[6] Jerončič, R. New EU type-approval legislation for agricultural and forestry vehicles. *Mechanical Engineering Scientific Journal* **47** (2015).

[7] Lebedev, D. O., Okunev, A. P., Borovkov, A. I., Klyavin, O. I. and Aleshin, M. V. A program for automatic calculation of strength of the rollover protective structure (ROPS) intended for a tractor with regard to the stress-strain behavior of the structure, recorded at the previous stage of calculation, 2017.

[8] LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume II. Material Models, References and Appendices, 2001.

[9] Wang, J. X., Yang, X. and Yu, X. J. Nonlinear finite element analysis and test of lateral loading for two-post ROPS. *Applied Mechanics and Materials*, 2009, 866-870.

[10] Zhao, X., Zhang, W. M. and Yang, J. Simulation of Roll-Over Protective Structure and Falling Object Protective Structure Tests on Heavy-Duty Mining Dump Truck. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 188-192.

Received: 23 July 2018/Accepted: 21 Aug 2018

ПРОВЕДЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ КАБИНЫ ТРАКТОРА ПО ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.

Егорова Д.А, Иванов К.С., Лебедев Д.О., Никулина С.П.

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проведение виртуальных испытаний кабины трактора по пассивной безопасности в программном комплексе LS-DYNA. Проведены лабораторные испытания образцов углеродистой стали марки Ст3пс [1], по результатам которых разработана математическая модель материала. Разработаны критерии качества сетки конечных элементов и технология для увеличения точности результатов проведения виртуальных испытаний по пассивной безопасности тракторов. Проведено сопоставление результатов натурных и виртуальных испытаний.

Ключевые слова: пассивная безопасность, сельскохозяйственная техника, математическая модель, устройство защиты от падающих предметов (FOPS), устройство защиты от опрокидывания (ROPS), прочность конструкций, динамический расчет, конечно-элементная модель (КЭМ).

1. Введение

Благодаря развитию методов компьютерного моделирования стало возможным проводить виртуальные исследования по пассивной безопасности на основе метода конечных элементов. Подобное моделирование приведено в работах [2], [3] и [4].

Работа [2] посвящена нелинейному статическому анализу конечно-элементной модели двухстоечной рамы безопасности трактора при боковой нагрузке. Приводится сравнение виртуальных и натурных испытаний, при которых наблюдается идентичное поведение материала. В работе [3] рассматривается поведение системы защиты при приложении нагрузки до достижения предписанной энергии, а также проводится серия испытаний падения предмета с высоты на кабину трактора. Виртуальное исследование реагирования конструкции на нагрузку даёт ценную информацию об её эффективности, и, как следствие, возможность улучшать критические зоны. В работе [4] проведены похожие виртуальные испытания средств защиты от возможного опрокидывания кабины грузовика. Имитация статической нагрузки выполнена в программном пакете ABAQUS. Результаты показывают, что испытываемая система защиты соответствует требованиям. Кабина выдерживает приложенную нагрузку и защищает оператора. Расчёт показывает, что рама безопасности ROPS является реальной и безопасной системой для сверхмощного самосвала.

В настоящей же работе выполнены более сложные динамические исследования пассивной безопасности тракторов на основе явного метода, проведены механические испытания образцов стали, на базе которых создана математическая модель материала. Также имеется сравнение с натурными исследованиями, которые проводились на стенде, идентичном конструкции реальной машины. Вертикальная жёсткость испытательного стенда та же, что и в реальной конструкции кабины трактора. Также отличительной особенностью настоящей работы является использование напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции ROPS, полученное на предыдущем этапе виртуальных испытаний, что положительно сказывается на точности расчётов.

2. Постановка задачи

В соответствии с ТР ТС 031/2012 [5] кабина трактора должна удовлетворять общепринятому Европейскому стандарту в области пассивной безопасности: FOPS (Falling-object protective structures) [6] и ROPS (Roll-over protective structures) [7]. Для снижения тяжести дорожно-транспортного происшествия изготавливается структура FOPS, предназначенная для защиты оператора от возможного падения предметов сверху, а также рама безопасности ROPS для обеспечения безопасности оператора при опрокидывании спецтехники.

В настоящей работе поставлена задача виртуального проведения вышеупомянутых испытаний с использованием современных подходов компьютерного инжиниринга, а также разработка рекомендаций по повышению точности проводимых виртуальных испытаний:

- проведены лабораторные испытания образцов материала, на базе которых разработана соответствующая математическая модель;
- разработаны критерии качества сетки конечных элементов;
- разработана технология учёта НДС конструкции кабины, полученного на предыдущем этапе расчёта.

3. Разработка модели материала

При моделировании соударения объектов важную роль играет описание пластических эффектов в материале. Модель Джонсона–Кука (*MAT_JOHNSON_COOK) [8] позволяет учитывать высокую скорость деформации, большую по величине деформацию и высокую скорость воздействия, поэтому данная модель материала является наиболее подходящей для расчётов силовых защитных каркасов кабин (FOPS, ROPS) при соответствующем подборе и валидации модели материалов на основе натурных испытаний образцов. Согласно данной модели действующие напряжения рассчитываться по следующей формуле:

$$\sigma = \left(a + b\varepsilon_p^n\right)\left(1 + c\ln\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где σ – напряжение; ε_p – пластические деформации; a – предел текучести; b – модуль упрочнения; n – упрочняющий показатель; c – коэффициент скорости деформации; ε – скорость деформации; ε_0 – опорное значение скорости деформации; T – температура.

Для проведения натурных испытаний выбрана листовая сталь марки Ст3пс как наиболее популярный материал для изготовления каркасов кабин и несущих элементов сельхозтехники. Из этого материала вырезают образцы стандартных размеров (Рис. 1). Для оценки достоверности получаемых данных испытывают три образца.

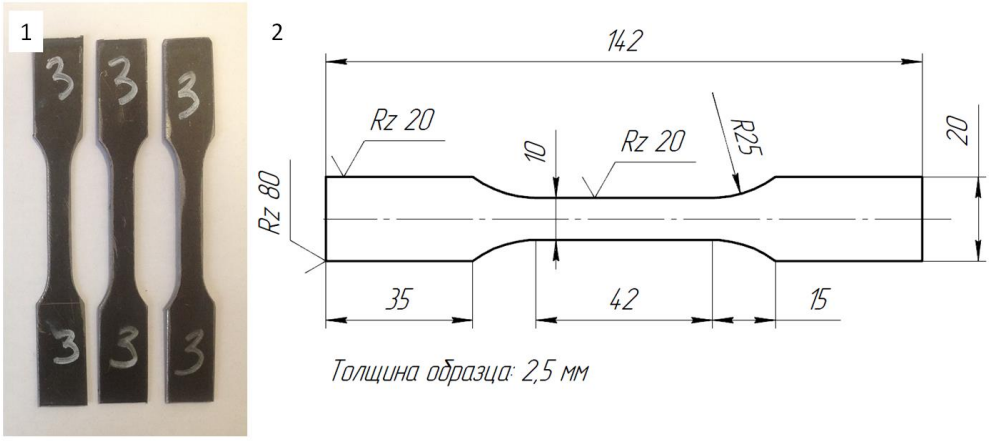


Рис. 1 - Стандартные образцы: а - для натурных испытаний, б – чертеж

Химический состав стали марки Ст3пс приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав материала испытуемых образцов

Марка стали	Массовая доля химических элементов		
	углерода	марганца	кремния
Ст3пс	0,14…0,22	0,40…0,65	0,05…0,15

Натурные испытания образцов материала проводятся на сертифицированной экспериментальной разрывной установке, которая в процессе проведения испытаний записывает данные о возникающих в материале напряжениях и соответствующих деформациях (Рис. 2).

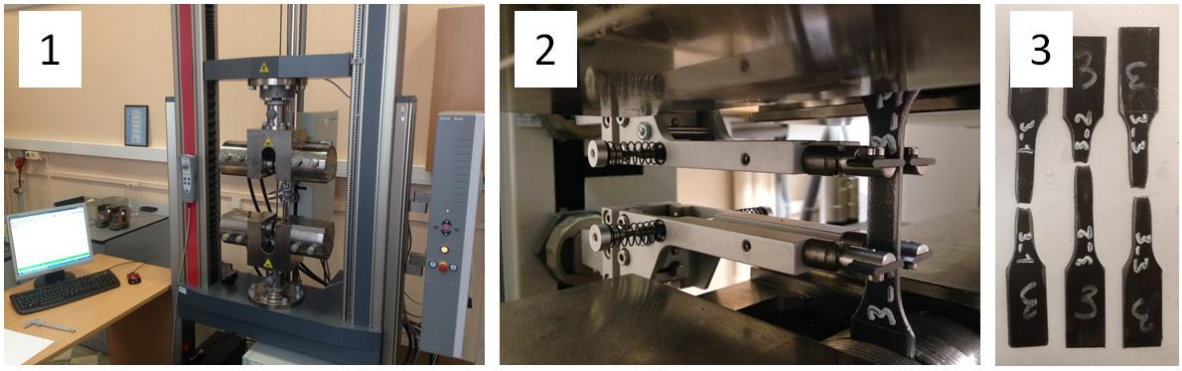


Рис. 2 - Экспериментальная установка (а, б) и стандартные экспериментальные образцы после испытаний (в)

Полученные данные напряжений в зависимости от деформаций трёх образцов усредняются и переводятся из инженерных единиц (Рис. 3) в истинные по формулам:

$$\delta = \ln(\varepsilon + 1), \quad (2)$$

$$S = \sigma(\varepsilon + 1), \quad (3)$$

где δ – истинные деформации; ε – инженерные деформации; S – истинные напряжения; σ – инженерные напряжения.

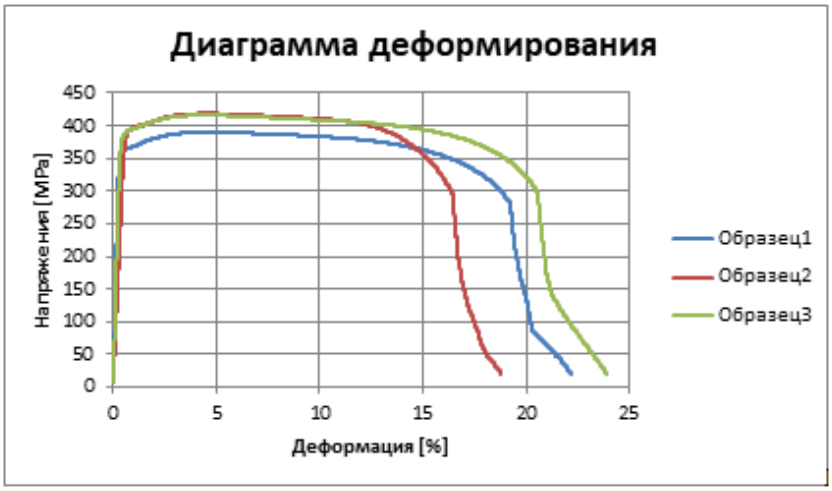


Рис. 3 - Экспериментально замеренные диаграммы деформирования в инженерных размерностях

В результате диаграмма деформирования представляется в том виде, в котором ее можно использовать для виртуальных испытаний по пассивной безопасности на основе метода конечных элементов (Рис. 4) [9]

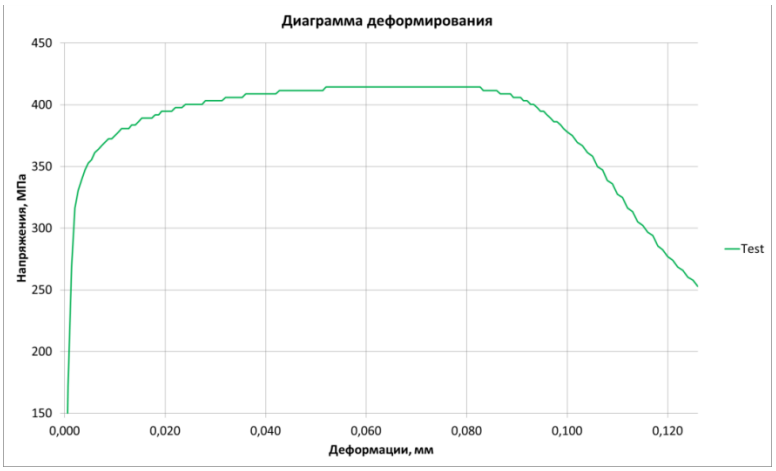


Рис. 4 - Усредненная экспериментальная диаграмма деформирования в истинных размерностях

4. Разработка технологии расчёта и критериев качества сетки

4.1. Для удешевления и сокращения сроков разработки кабины трактора проводятся виртуальные испытания, имитирующие натурные. Согласно ГОСТ Р ИСО 5700-2008, ROPS трактора подвергается четырем испытаниям (нагружение в продольном направлении, нагружение в поперечном направлении и два испытания на сжатье - в передней и задней части). Испытания проводятся последовательно на одном ROPS трактора. То есть на втором, третьем и четвёртом этапе испытаний ROPS изначально деформирован и имеет в конструкции определенный уровень остаточных напряжений. При проведении виртуальных испытаний данным фактором обычно пренебрегают и при проведении испытаний используют начальную конечно-элементную модель, что неблагоприятно сказывается на точности расчетов.

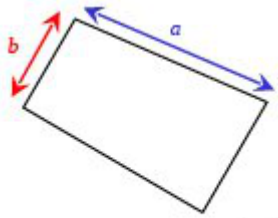
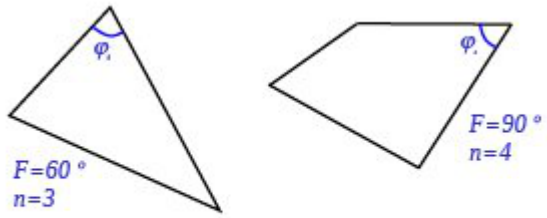
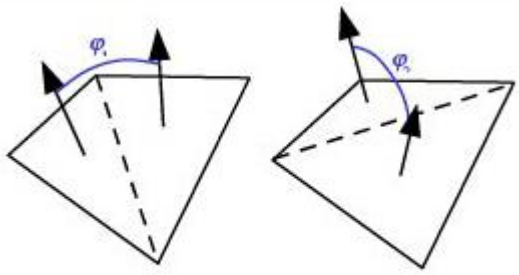
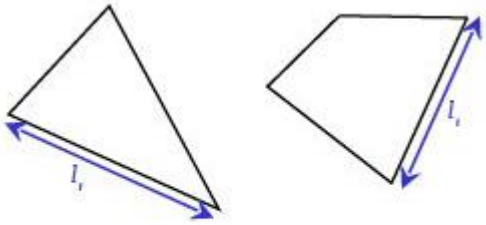
Для увеличения точности проведения виртуальных испытаний по пассивной безопасности тракторов в части защиты при опрокидывании была разработана соответствующая программа для ЭВМ [10]**,** которая обеспечивает:

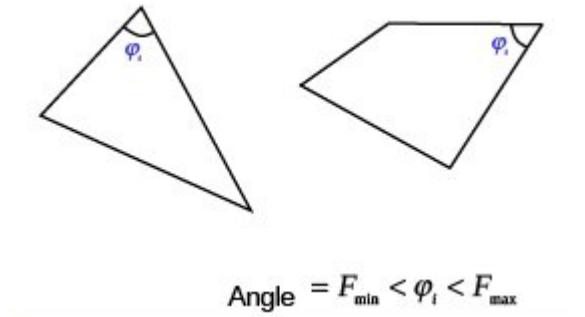
- автоматизированную загрузку необходимых файлов предыдущего расчетного случая;
- расчет энергии, поглощенной ROPS во время проведения виртуальных испытаний и определение целевого значения данной энергии;
- формирование файла, содержащего необходимые данные для проведения следующего этапа испытаний.

4.2. Качество разбиения модели на конечные элементы значительно влияет на результаты расчета. В таблице

4.5. Таблица 2 приведены рекомендуемые требования к конечным элементам для минимизации погрешности расчетов.

Таблица 2 – Критерии качества сетки

№	Критерий	Значение	Пояснение
1	Соотношение сторон (Aspect ratio)	4	 Aspect ratio $= \max\left(\frac{a}{b}\right)$
2	Асимметрия (Skewness)	125	 Skew angle $= \sum_{1}^{n} \lvert F - \varphi_i \rvert$
3	Коробление (Warping)	15	 Warping Angle $= \max(\varphi_1, \varphi_2)$
4	Минимальная длинна (Min Length)	4	 Minimum length $= \min(l_i)$ Maximum length $= \max(l_i)$
5	Максимальная длина (Max Length)	15	См. 4

6	Минимальный угол для квадратных элементов (Min angle quads)	40	
7	Максимальный угол для квадратных элементов (Max angle quads)	140	См. 6
8	Минимальный угол для треугольных элементов (Min angle trials)	30	См. 6
9	Максимальный угол для треугольных элементов (Max angle trials)	120	См. 6
10	Процент треугольных элементов Triangles, %	10	Процентное соотношение треугольных элементов относительно четырехугольных

5. Проведение виртуальных испытаний: FOPS/ROPS.

Испытания устройства защиты от падающих предметов (FOPS) трактора.

Нормативным документом при проведении виртуальных испытаний устройства защиты от падающих предметов является [6]. В лабораторных условиях данные испытания проводят путем сбрасывания стандартного предмета (индентора) заданной формы и массы с определенной высоты.

Уровень I защиты от проникновения (level I impact protection): Сопротивление удару от небольших падающих объектов (например, кирпича, небольших бетонных блоков, ручного инструмента) на ландшафтных участках расчистки, при работах на магистралях и других работах по обслуживанию. Уровень II защиты от проникновения (level II impact protection): Сопротивление удару от больших падающих объектов (например, деревьев, кусков горной породы) для машин на участках расчистки, при лесоразработках. Параметры испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры испытаний

Уровень защиты от проникновения	Параметры стандартного предмета		
	Форма	Масса, кг	Высота сбрасывания, м
Уровень I защиты от проникновения	круглая	45	3,1
Уровень II защиты от проникновения	цилиндрическая	227	5,22

В соответствии с данным ГОСТом рассматривается падение индентора массой 45 кг с высоты 3,1 м и индентора массой 227 кг с высоты 5,22. Так как второй случай является более опасным, далее в настоящей работе будем рассматривать именно его. На рисунке 5 показано расположение индентора относительно крыши кабины трактора. При проведении исследований в кабине трактора расположен DLV (deflection limiting volume), имитирующий оператора трактора. В натурных испытаниях устанавливается аналогичная конструкция.

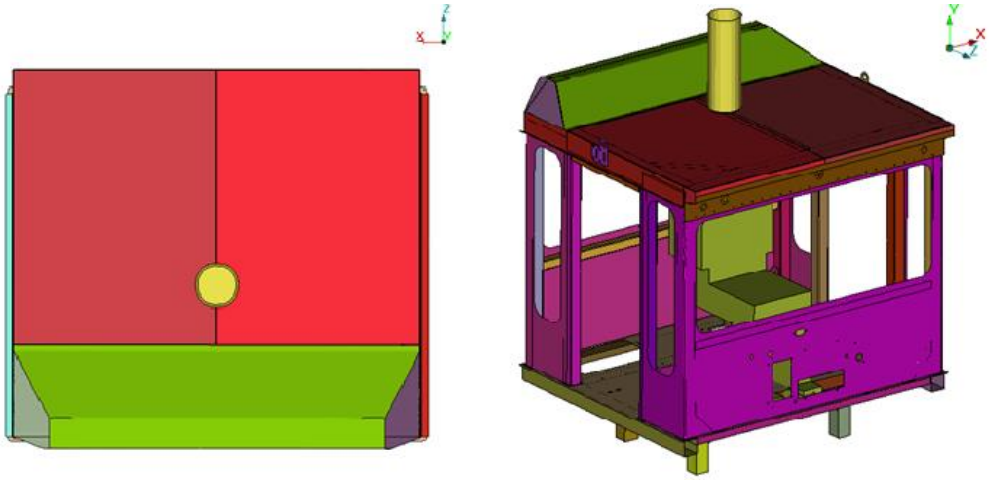


Рис. 5 - Расположение индентора относительно крыши кабины

В данном расчётном случае максимальные перемещения крыши кабины составили 106 мм (Рис. 6).

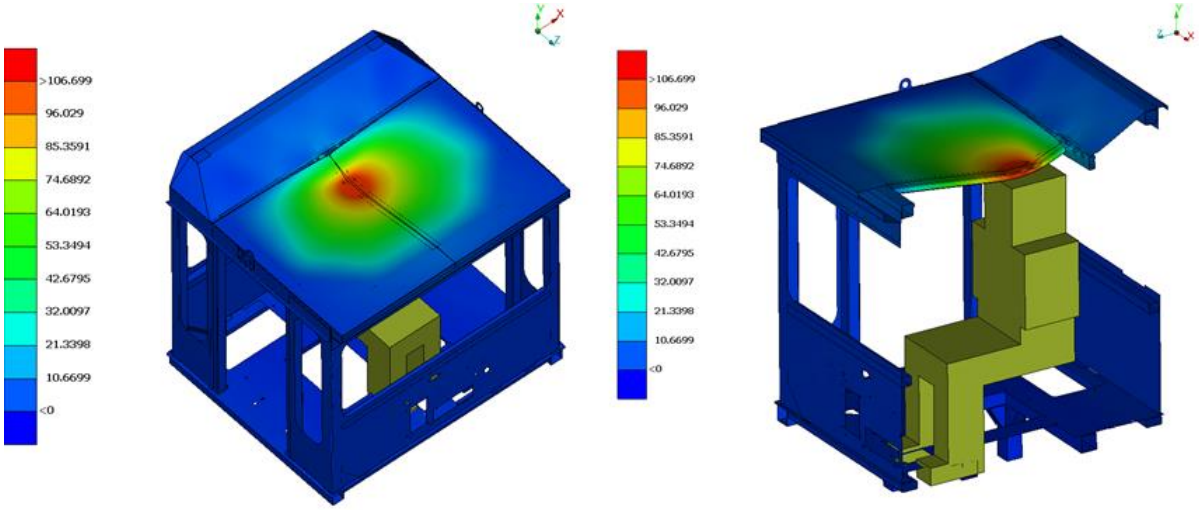


Рис. 6 – Суммарные перемещения во время удара, мм.

При нанесении испытательного удара в точке расположенной над головой оператора индентором массой 227 кг с высоты 5,22 м, деформируемые конструкции нарушают пространство DLV. Центральная продольная балка крыши проникает в DLV примерно на 7 мм. В результате чего центральная балка крыши была усилена, и при повторных виртуальных испытаниях прогиб уменьшился на 12 мм.

6. Испытания устройства защиты от опрокидывания (ROPS) трактора.

Виртуальные испытания проводятся в соответствии с [7]. В лабораторных условиях прочность ROPS проверяют приложением статической силы и статическими испытаниями на сжатие, имитирующими нагрузки, которые могут воздействовать на ROPS при перевороте трактора назад, вперед или вбок без свободного падения. Испытания позволяют оценить прочность ROPS и элементов его крепления к трактору, а также частей трактора, на которые может передаваться нагрузка от ROPS.

Согласно данному ГОСТу рассматривается несколько расчётных случаев нагружения кабины трактора. На рисунках 8, 9, 7 приведены схемы приложения нагрузки для пяти расчётных случаев нагружения. При проведении виртуальных испытаний использовалось напряженно-деформированное состояние конструкции, полученное на предыдущей итерации.

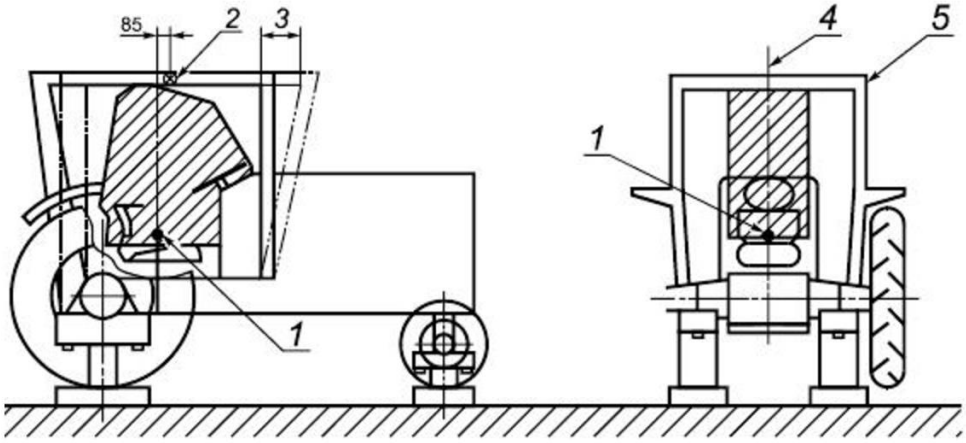


Рис. 7 - Приложение силы сбоку, где 1 - SIP; 2 - точка приложения силы сбоку; 3 - деформация под воздействием приложения силы сзади; 4 - продольная плоскость симметрии; 5 - сила сбоку

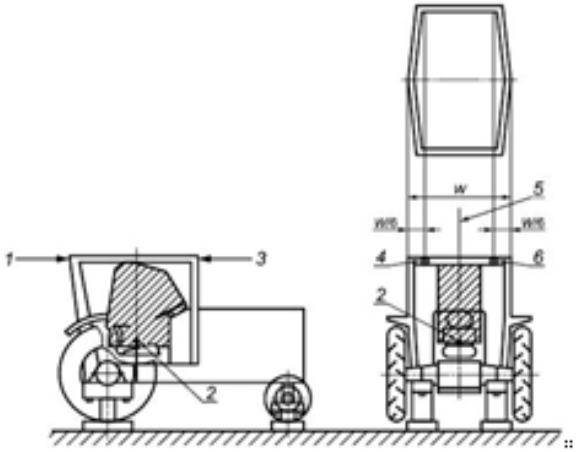


Рис. 8 - Приложение силы спереди и сзади, где 1 - сила сзади; 2 – контрольная точка сиденья (SIP); 3 - сила спереди; 4 - точка второго приложения силы спереди или сзади; 5 - продольная плоскость симметрии; 6 - точка первого приложения силы сзади или спереди.

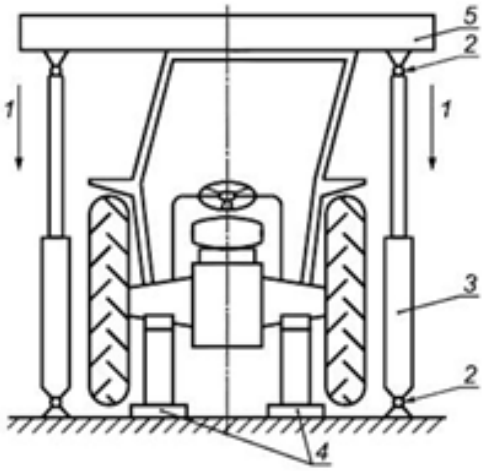


Рис. 9 – Схема приложения нагрузки при испытаниях на сжатие, где 1 - сила; 2 -

универсальный шарнир; 3 - гидроцилиндр; 4 - опоры под передней и задней осями; 5 - нагружающая балка

Проведено пять виртуальных испытаний устройства защиты при опрокидывании. Последовательность проведённых испытаний:

- Проверка прочности ROPS при горизонтальном нагружении спереди (продольное нагружение). Схема приложения нагрузки изображена на рисунке 8.
- Проверка прочности ROPS при приложении вертикальной нагрузки в передней части (первое испытание на сжатие). Схема приложения нагрузки изображена на рисунке 9.
- Проверка прочности ROPS при горизонтальном нагружении (боковое нагружение). Схема приложения нагрузки изображена на рисунке 7.
- Проверка прочности ROPS при приложении вертикальной нагрузки в задней части (второе испытание на сжатие). Схема приложения нагрузки изображена на рисунке 9.

Дополнительно проведено испытание проверки прочности ROPS при горизонтальном нагружении сзади (продольное нагружение), так как развесовка трактора по осям 50×50. Схема нагружения изображена на рисунке 8.

Брусом (640×110 мм) к кабине трактора прикладывается равномерно распределенная линейно возрастающая нагрузка. Нагружение останавливается при достижении поглощенной энергии:

$$E_{il1} = 1{,}4 m_t,$$

где m_t - расчетная масса трактора, 23000 кг.

На рисунках 10-14 приведены суммарные перемещения конструкции и эквивалентные напряжения по Мизесу при различных нагружениях в момент времени, на котором достигается требуемое поглощение энергии.

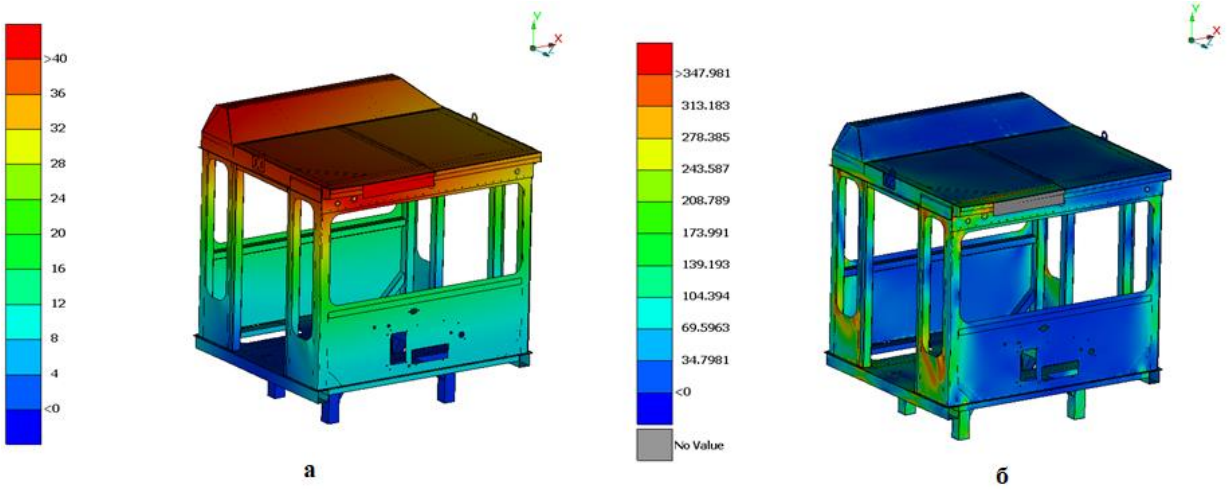


Рис. 10 – Результат виртуального испытания при горизонтальном нагружении спереди (продольное нагружение).а – суммарные перемещения, мм; б – эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

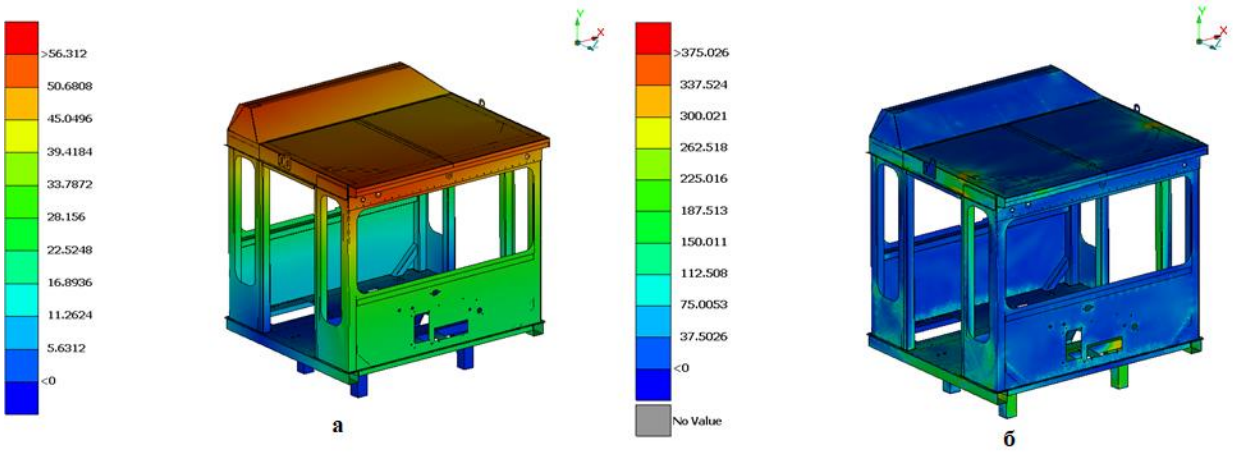


Рис. 11 – Результат виртуального испытания при приложении вертикальной нагрузки в передней части (первое испытание на сжатие).а – суммарные перемещения, мм; б – эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

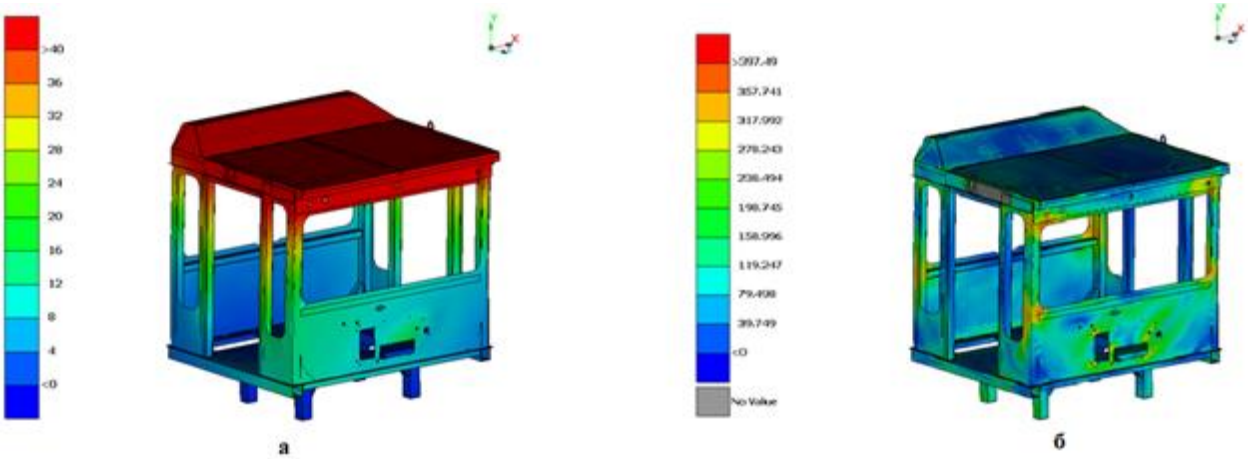


Рис. 12 – Результат виртуального испытания при горизонтальном нагружении (боковое нагружение).а – суммарные перемещения, мм; эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

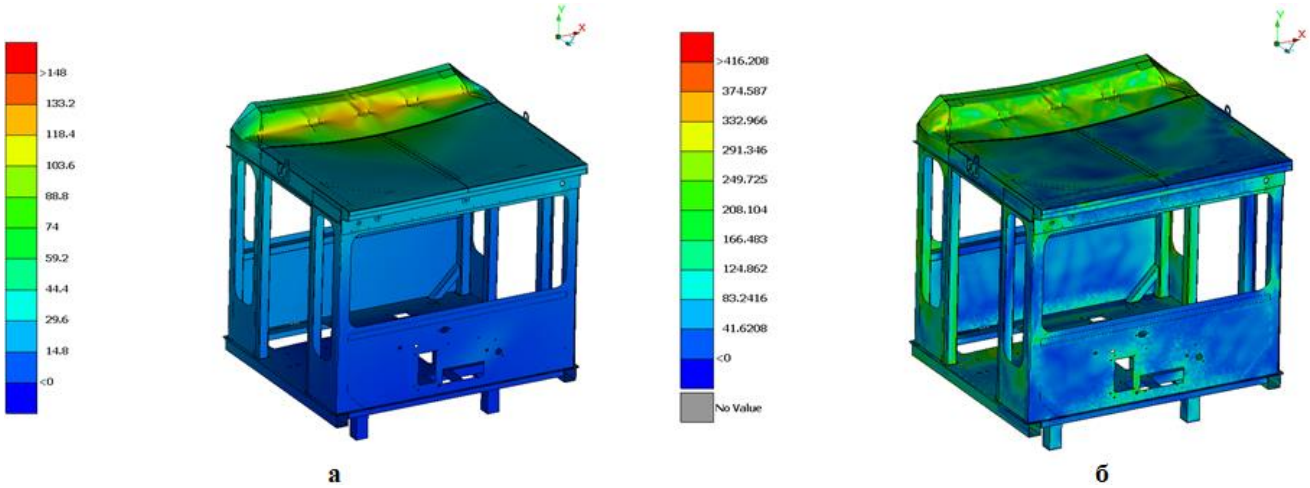


Рис. 13 – Результат виртуального испытания при приложении вертикальной нагрузки в задней части (второе испытание на сжатие).а – суммарные перемещения, мм;
б - эквивалентные перемещения по Мизесу, МПа

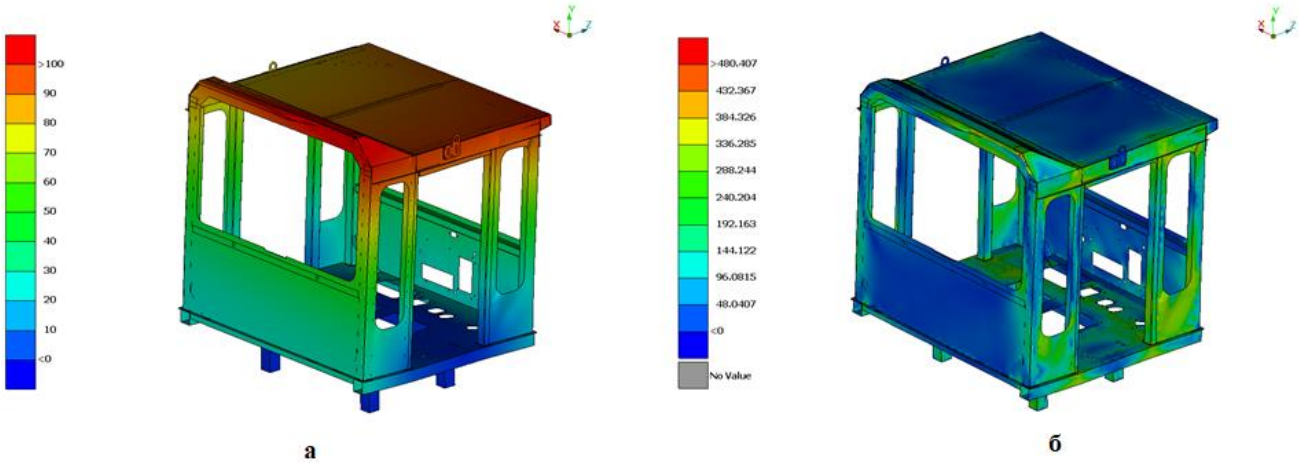


Рис. 14 – Результат виртуального испытания при горизонтальном нагружении сзади (продольное нагружение).а – суммарные перемещения, мм;
б - эквивалентные перемещения по Мизесу, МПа

7. Сопоставление данных натурных и виртуальных испытаний.

Испытательной лабораторией средств механизации и транспорта были проведены сертификационные испытания устройства защиты от падающих предметов (FOPS), а также устройства защиты от опрокидывания (ROPS) каркаса кабины модели УДМ2 Петра-ЗСТ, соответствуя ГОСТ Р ИСО 3449-2009, уровень II (рис. 15).

Рис. 15 - общий вид защитного устройства (каркаса кабины) а)в момент приложения нагрузки, б) после завершения нагружения

В таблице 4 приведено сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний.

Таблица 4 – Сравнение натурных и виртуальных испытаний

Расчётный случай	Виртуальные испытания, мм	Натурные испытания, мм	Погрешность, %
FOPS, Уровень II	90,28	88,16	2,40
ROPS, Продольное нагружение	44,55	45,20	1,40
ROPS, Первое испытание на сжатие	56,23	59,11	4,87
ROPS, Боковое нагружение	40,45	42,50	4,82
ROPS, Второе испытание на сжатие	148,60	146,90	1,15
ROPS, Продольное нагружение	65,51	67,74	3,29

8. Выводы

Благодаря правильному выбору модели материала, точному моделированию геометрии и расчётных случаев, высокому качеству разбиения сетки, а также использованию технологии по учету НДС конструкции ROPS, полученного на предыдущем этапе виртуальных испытаний, получены результаты максимально приближённые к результатам натурных испытаний. Погрешность вычислений не превышает 5%. Отсюда следует, что при помощи компьютерного моделирования можно создать наиболее оптимальную, прочную и безопасную конструкцию, тем самым уменьшить количество натурных испытаний.

Благодарности

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы", Мероприятие 1.3., Соглашение о предоставлении субсидии №14.578.21.0206 от 03.10.2016, уникальный идентификатор ПНИЭР: RFMEFI57816X0206.

Литература

[1] ГОСТ 380-2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. – 8с.

[2]Jixin Wang, Xun Yang, Xiangjun Yu. Nonlinear Finite Element Analysis and Test of Lateral Loading for Two-post ROPS // Applied Mechanics and Materials, 2009. – V.16-19 – P. 866-870.

[3] D. Hailoua Blanco, C. Martin, A. Ortalda. Virtual FOPS and ROPS Testing on Agricultural Tractors. According to OECD Standard Code 4 and 10 // Proc. Of 14th International LS-DYNA Users Conference (Detroit, USA, 2016), p. 1-21

[4] Xuan Zhao, Wen Ming Zhang, Jue Yang. Simulation of Roll-Over Protective Structure and Falling Object Protective Structure Tests on Heavy-Duty Mining Dump Truck // Applied Mechanics and Materials, 2014. – V.529 – P.188-192

[5] ТР ТС 031/2012 О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним. – 60 с.

[6] ГОСТ Р ИСО 3449-2009 Машины землеройные. Устройства защиты от падающих предметов. Лабораторные испытания и технические требования.

[7] ГОСТ Р ИСО 3471 – 2009 Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания

[8] LS-DYNA Keyword User’s Manual. Volume II. Material Models, References and Appendices, 2001.

[9] А.И. Боровков, О.И. Клявин, О.И. Рождественский, М.В. Алешин, А.Н. Леонтьев, С.П. Никулина, К.С. Иванов, А.П. Окунев. Валидация математической модели изотропного материала с использованием параметрической оптимизации его физико-механических характеристик, СПб – 11с.

[10] Лебедев Д.О., Окунев А.П., Боровков А.И., Клявин О.И., Алешин М.В. Программа для автоматизированного расчета прочности устройства защиты при опрокидывании (ROPS) трактора, учитывающая напряженно-деформированное состояние конструкции (НДС), полученное на предыдущем этапе расчета. Свидетельство № 2018612683