

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS WORKBENCH НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ АЭРОДРОМНОЙ ТЕХНИКИ

Субачев Евгений Владимирович,
ООО "Завод Спецагрегат", Миасс, Россия, 777_sev@mail.ru

Никитин Дмитрий Александрович,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия, d.nikitin@madi.ru

Ершов Владимир Сергеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия, vsershov21@gmail.com

Акулов Алексей Андреевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия, a.akulov.98@mail.ru

Талдыкин Дмитрий Сергеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия, dima.dima.taldykin@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-12-32-38

Manuscript received 20 November 2022;
Accepted 30 November 2022

Ключевые слова: ANSYS Workbench, аэродромная техника, конструкция технологического оборудования, расчет конструкции на прочность

Использование современных компьютерных технологий позволяет достичь высоких практических и экономических результатов в различных областях промышленности. Активно развиваются и информационные технологии, используемые в проектировании. Появляется все большее количество разнообразных программ компьютерного моделирования. В статье предложена 3D модель конструкции металлического надрамника с последующим расчетом действующих на него нагрузок в программном комплексе ANSYS Workbench 16.2 с помощью модуля Static Structural. Приведены эпюры нагружений и сформированы графики перемещения исследуемого конструкционного узла при четырех случаях движения аэродромной спецтехники. Произведен анализ динамических характеристик движения автомобиля и коэффициентов сцепления с дорожной, в ходе которого определены численные значения, подходящие для разрабатываемой системы, с целью расчета контактных и бесконтактных сил. В ходе исследований, при каждом виде движения, были выявлены численные значения нагрузок по трем основным осям. Указаны опасные участки, где возможны случаи нарушения целостности конструкции. На основе полученных данных сформирован вывод, позволяющий разработать конструкцию аэродромной поливомоечной машины, при этом исключив недостатки и ошибки в ходе проектирования силовых узлов техники.

Информация об авторах:

Субачев Евгений Владимирович, генеральный директор, ООО "Завод Спецагрегат", Миасс, Россия

Никитин Дмитрий Александрович, заместитель начальника УНИР, МАДИ, Москва, Россия

Ершов Владимир Сергеевич, преподаватель, МАДИ, Москва, Россия

Акулов Алексей Андреевич, преподаватель, МАДИ, Москва, Россия

Талдыкин Дмитрий Сергеевич, студент, МАДИ, Москва, Россия

Для цитирования:

Субачев Е.В., Никитин Д.А., Ершов В.С., Акулов А.А., Талдыкин Д.С. 3D-моделирование в программном комплексе Ansys workbench на примере расчета конструкций аэродромной техники // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №12. С. 32-38.

For citation:

Subachev E.V., Nikitin D.A., Ershov V.S., Akulov A.A., Taldykin D.S. (2022) 3D modeling in the Ansys workbench software complex on the example of aerodrome equipment structures calculation. T-Comm, vol. 16, no. 12, pp. 32-38. (in Russian)

Введение

На сегодняшний день, перед реализацией проектов производят предварительное 3D моделирование различных деталей с последующим расчетом в программных комплексах (ПК). Данное решение позволяет получить предварительные численные значения физических эксплуатационных характеристик узлов и механизмов. Такие ПК классифицируются исходя из целей, которые, в свою очередь, достигаются в процессе использования того или иного программного обеспечения с сопутствующими дополнениями. В следствие вышесказанного возможно выделить две основные группы комплексов: CAD-системы (Computer-Aided Design) и CAE-системы (Computer-Aided Engineering) [1,2].

Зачастую CAE и CAD-системы используют совместно, что позволяет объединить их функционал и добиваться создания максимально эффективных механизмов взаимодействия, обмена данных и интеграции систем. Наиболее известными CAE-комплексами являются ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN и т. д. Стоит отметить, что в последние годы активно совершенствуются отечественные аналоги данных ПК Fidesys и Логос.

ANSYS имеет объединение функционала множества приложений, которые позволяют произвести расчет задач по электромагнетизму и механике демпфирующего твердого тела. Данный программный комплекс основан на эффективных алгоритмах распараллеливания и позволяет рационально распределить время расчета, сокращая его в несколько раз. С помощью инструментов работы ANSYS возможно подготовить расчетные геометрические и конечно-элементарные модели с последующей обработкой результатов.

Программное обеспечение для CAE/CAD также может быть классифицировано по типу предоставляемых разработчиком лицензий:

1) св одно распространяемое программное обеспечение: CalculiX, OpenFOAM, BRL-CAD, Electric, freeCAD (A.S.Koh's), FreeCAD (JuergenRiegel's), gEDA, KiCad, LibreCAD и т. д.;

2) проприетарное (коммерческое) программное обеспечение: ANSYS, NASTRAN, SCAD, SolidWorks, Spectra, SprutCAM, T-FLEX CAD, Tecnomatix, TopoR, Turbo-CAD, VariCAD, ZWCAD, Компас и т. д.

В связи с постоянными разработками новых конструкций узлов и агрегатов машинных комплексов, ANSYS является неотъемлемой частью производства ведущих промышленных компаний, таких как Volkswagen-Audi, FIAT, BMW, БелАЗ, Mitsubishi, Boeing и т.д.

Структура программного комплекса ANSYS и Платформа Workbench

Программное обеспечение ANSYS является многоцелевым функциональным продуктом, позволяющим смоделировать физические процессы и явления для последующего их численного расчета. Данный ПК обладает широким спектром инструментов, благодаря которому его часто используют для расчета механики деформируемого тела. Стоит отметить, что ANSYS позволяет решать задачи из областей теплофизики, акустики, электромагнетизма, динамики жидкостей и газов.

Резюмируя, ANSYS является объединением различных дополнений в рамках единого рабочего пространства и включает в себя наборы моделирования различных физических процессов и вычислительных методов. Например, ПК ANSYS, в дополнении с платформой Workbench, интегрирует в единую вычислительную среду отдельные приложения и позволяет им работать как единое комплексное программное обеспечение.

Платформа Workbench способна обрабатывать, систематизировать и хранить полученные результаты расчетов, осуществляя работу в интерактивном режиме, используя пользовательский графический интерфейс.

В связи с тем, что разработка проекта выполняется инженерами и исследователями из различных отраслей, рассматриваемый ПК позволяет объединить специалистов в едином пространстве для моделирования.

Расчетная модель надрамника аэродромной поливомоечной машины

Специальная аэродромная техника (средства аэродромно-технического обеспечения) разрабатывается для обслуживания аэродромов и выполнения специфических задач. В данной статье рассмотрено трехмерное моделирование надрамника аэродромной поливомоечной машины (АПММ), который устанавливается на раму базового автомобиля. АПММ обеспечивает уборку взлетно-посадочных полос (ВПП) и рулежных дорожек (РД) как в зимний, так и в летний период времени в составе разрабатываемого комплекса аэродромных машин (КАМ) [3,4].

Рассматриваемая АПММ выполняет работы по круглогодичной уборке искусственных покрытий аэродрома методом смета снега, льда, воды, пыли и песка, мелких камней и мусора с предварительным смачиванием покрытий водой в летний период и противообледенительным жидким реагентом в зимний период.

Уборка ВПП и РД в летний период с помощью АПММ включает в себя: очистку от грязи, пыли, мусора и других посторонних предметов, а также удаление резиновых отложений, битумных и масляных пятен. В зимний период к работам может добавляться обработка ВПП противообледенительным жидким реагентом. Как дополнительная опция – имеется возможность установки переднего отвала на переднюю монтажную плиту, к которой крепится передняя рейка водяной системы.

Для расчета конструкции на динамические нагрузки, с помощью программного обеспечения (ПО) ANSYS Workbench 16.2 производится формирование объемной 3D модели, а также задаются основные физические параметры и моделируются нагрузки. Данное ПО позволяет определить области концентрации нагрузок, на которые стоит обратить внимание в случае усиления силовой конструкции автомобиля.

Надрамник устанавливается на раму базового автомобиля, в свою очередь, на нём размещаются три пластмассовых бака с водой (каждый объемом 3 м³) и гидростанция (массой 346 кг) как показано на рисунке 1 [5-7].

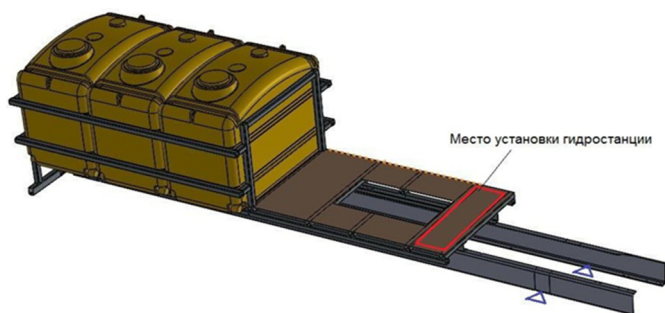


Рис. 1. Надрамник АПММ с установленными баками, опирающийся на лонжероны, которые, в свою очередь, опираются на оси шасси

Металлоконструкция надрамника совместно с металлическим каркасом баков представлена на рисунке 2.

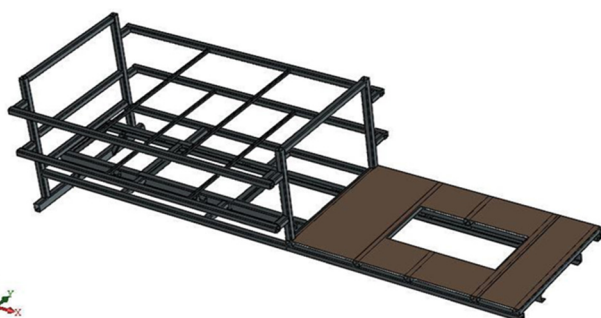


Рис. 2. Металлоконструкция надрамника

На металлоконструкцию надрамника действуют следующие массовые силы:

- тяжести $g=9,81 \text{ м/с}^2$;
- инерции движения a_z, a_x, a_y (табл. 1);
- инерции торможения $j, \text{ м/с}^2$ (табл. 2).
- инерции поворота $c, \text{ м/с}^2$.

Сила трения между днищем баков и основанием F_{TP} [8-11].

Таблица 1

Динамические характеристики движения автомобиля

Номер участка дороги	СКЗ* виброускорений над задней осью, м/с^2 , не более			
	Специальных АТС на базе легковых автомобилей и автобусов		Специальных АТС на базе грузовых автомобилей	
	\tilde{a}_z	\tilde{a}_x, \tilde{a}_y	\tilde{a}_z	\tilde{a}_x, \tilde{a}_y
Цементобетонная дорога (ВПП)	1,00	0,65	<u>1,30</u>	<u>0,80</u>

* Среднеквадратические значения

Таблица 2

Коэффициенты сцепления с дорогой

Коэффициент сцепления шин с дорогой									
Тип покрытия	Значение коэффициента								
	На сухом покрытии				На мокром покрытии				
Асфальтобетонное	0,7–0,8				0,4–0,6 (0,5)				
Бульжник, щебень	0,6–0,7				0,3–0,5				
Грунтовое	0,5–0,6				0,2–0,4				
Укатанный снег	0,2–0,3								
Гололед	0,1–0,2								
Коэффициент эффективности торможения $j, \text{ м/с}^2$									
Категория	В снаряженном состоянии				С полной нагрузкой				
	0,8	0,7	0,6	0,5	0,8	0,7	0,6	0,5	
M1	1,28	1,12	1,00	1,00	1,50	1,32	1,13	1,00	
M2	1,42	1,24	1,07	1,00	1,74	1,52	1,30	1,09	
M3	1,56	1,37	1,17	1,00	1,74	1,52	1,30	1,09	
N1	1,45	1,27	1,09	1,00	1,96	1,71	1,47	1,22	
N2	1,37	1,20	1,03	1,00	1,96	1,71	1,47	1,22	
N3	1,28	1,12	1,00	1,00	1,96	1,71	1,47	1,22	
Ав-топо-езд	N1	1,66	1,46	1,25	1,04	1,96	1,71	1,47	1,22
	N2	1,60	1,40	1,20	1,00	1,96	1,71	1,47	1,22
	N3	1,56	1,37	1,17	1,00	1,96	1,71	1,47	1,22

Категория N3; полная масса ТС > 12 т.

Центробежное ускорение определяется по формуле:

$$c = \frac{V^2}{R}, \quad (1)$$

где V – скорость движения АПММ по повороту; R – радиус поворота [12].

Допустим, что максимальная скорость машины при движении по повороту равна $20 \text{ км/ч} = 5,55 \text{ м/с}$, радиус поворота $R = 30 \text{ м}$, тогда $c = 5,55^2 / 30 = 1,027 \text{ м/с}^2$.

Рассматривается расчетный случай, когда все массовые силы складываются и действуют в одном направлении:

- вдоль вертикальной оси $Z (g + a_z)$;
- вдоль горизонтальной оси $X (j + a_x)$;
- вдоль горизонтальной оси $Y (c + a_y)$.

Вертикальная сила от трех баков:

$$F_Z = 3 \cdot p_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot (g + a_z) = 3 \cdot 1000 \cdot (9,28 + 1,3) = 99990 \text{ Н.}$$

Сила трения днища баков (пластмасса) по основанию надрамника (сталь), $f = 0,055$ – коэффициент трения.

$$F_{TP} = f \cdot F_Z = 0,055 \cdot 99990 = 5499 \text{ Н.}$$

Горизонтальные силы от трех баков:

$$F_x = 3 \cdot p_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot (j + a_x) - F_{TP} = 3 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot (1,22 + 0,8) - 5499 = 12681 \text{ Н.}$$

$$F_y = 3 \cdot p_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot (c + a_y) - F_{TP} = 3 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot (1,027 + 0,8) - 5499 = 10942 \text{ Н.}$$

Вертикальная сила от гидростанции:

$$Q_Z = m \cdot (g + a_z) = 346 \cdot (9,81 + 1,3) = 3844 \text{ Н.}$$

Напряженно-деформированное состояние (НДС) надрамника определено в программном комплексе ANSYS Workbench 16.2 с помощью модуля Static Structural.

Рассмотрено четыре случая нагружения надрамника:

- 1) при равномерном движении по ВПП;
- 2) при торможении;
- 3) при прохождении поворота на скорости до 20 км/ч;
- 4) при прохождении поворота и одновременном торможении на скорости до 20 км/ч.

Результаты и обсуждение

Равномерное движение по ВПП.

В этом случае на металлоконструкцию надрамника действуют только вертикальные силы F_z и Q_z . Лонжерон шасси описан схематично, он имитирует упругое основание надрамника.

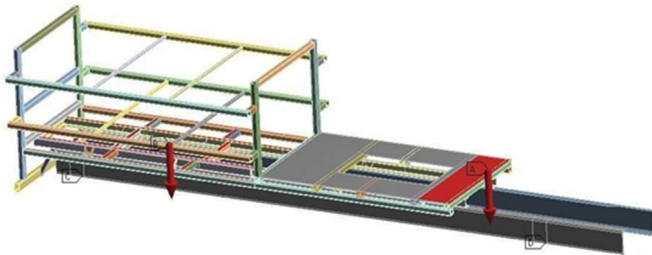


Рис. 3. Граничные условия, наложенные на модель надрамника (нагружение 1)

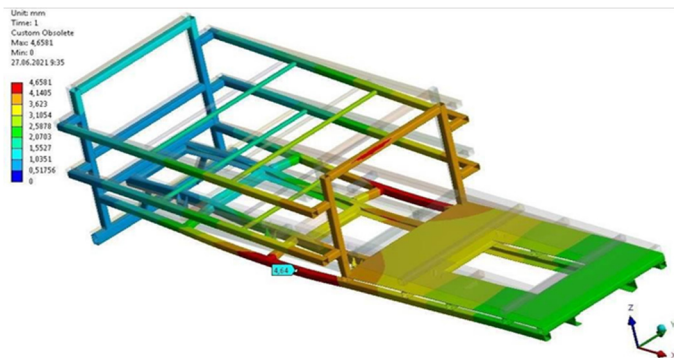


Рис. 4. Перемещения узлов модели надрамника (нагружение 1)

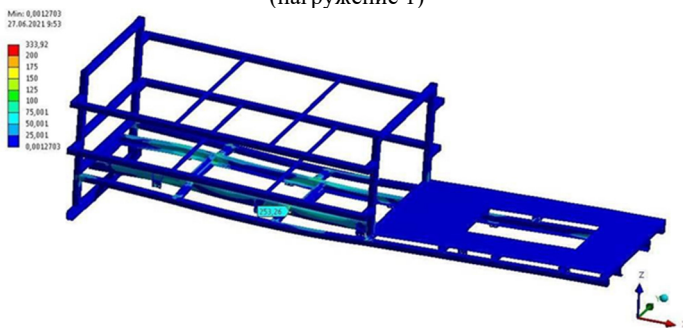


Рис. 5. Напряжения в элементах модели надрамника (нагружение 1)

Из данных эпюр следует, что максимальное перемещение узлов модели (4,65 мм) наблюдается в боковой трубе (сечение 80x80x6 мм) основания установки баков, максимальное напряжение (253 МПа) наблюдается в трубе – поперечине (сечение 80x80x6 мм) в месте примыкания её к лонжерону надрамника [13].

Торможение.

В этом случае на металлоконструкцию надрамника действуют вертикальные силы F_z , Q_z и горизонтальная сила F_x .

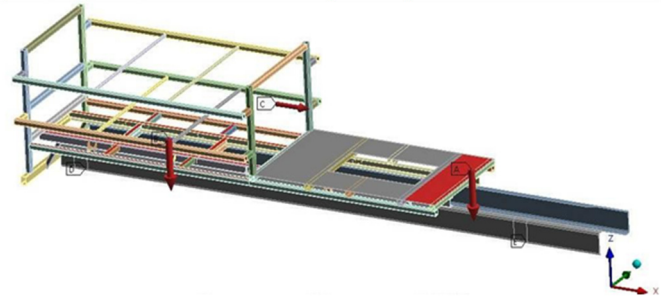


Рис. 7. Граничные условия, наложенные на модель надрамника (нагружение 2)

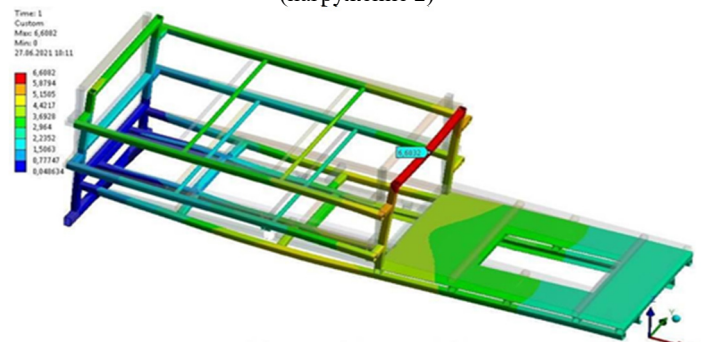


Рис. 8. Перемещения узлов модели надрамника (нагружение 2)

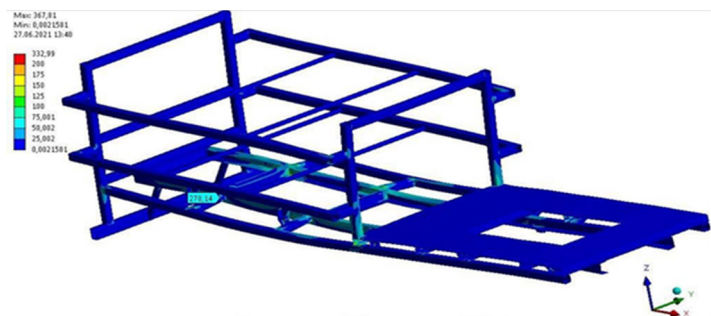


Рис. 9. Напряжения в элементах модели надрамника (нагружение 2)

Из данных эпюр следует, что максимальное перемещение узлов модели (6,6 мм) наблюдается в передней трубе – обвязке баков (сечение 80x80x6 мм), максимальное напряжение (278 МПа) наблюдается в трубе-поперечине (сечение 80x80x6 мм) в месте примыкания её к лонжерону надрамника [14].

Поворот на скорости до 20 км/ч.

В этом случае на металлоконструкцию надрамника действуют вертикальные силы F_z , Q_z и горизонтальная сила F_y .

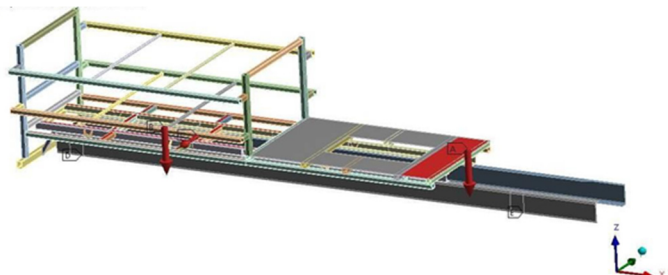


Рис. 10. Граничные условия, наложенные на модель надрамника (нагружение 3)

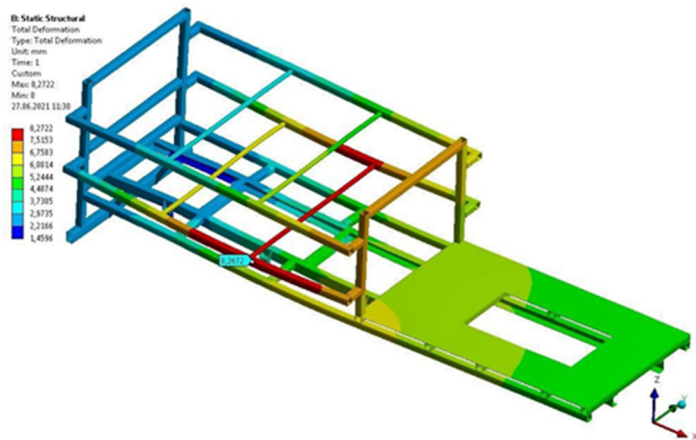


Рис. 11. Перемещения узлов модели надрамника (нагружение 3)

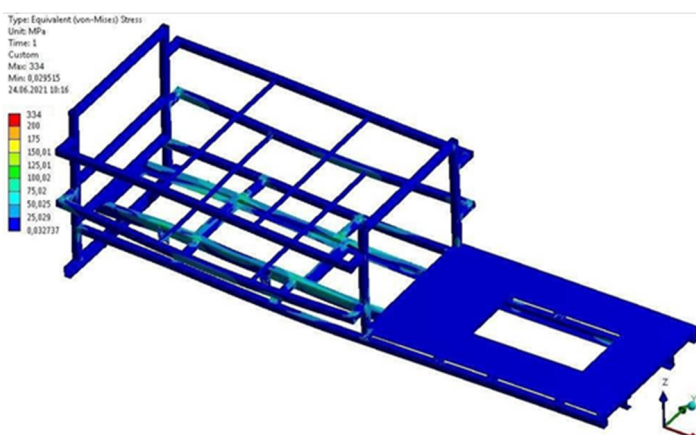


Рис. 12. Напряжения в элементах модели надрамника (нагружение 3)

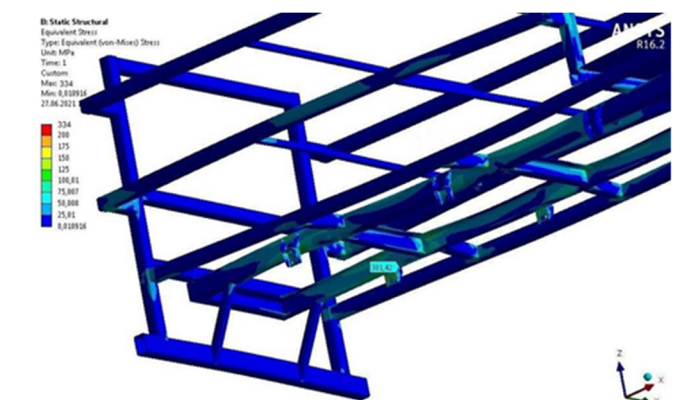


Рис. 13. Максимальное напряжение в элементах модели надрамника (нагружение 3)

Из данных эпюр следует, что максимальное перемещение узлов модели (8,27 мм) наблюдается в боковой трубе – обвязке баков (сечение 80x80x6 мм), максимальное напряжение (301 МПа) наблюдается в кронштейне надрамника в месте примыкания его к лонжерону.

Поворот на скорости до 20 км/ч при одновременном торможении на ВПП.

В этом случае на металлоконструкцию надрамника действуют вертикальные силы F_z , Q_z и горизонтальные силы F_y и F_x [15].

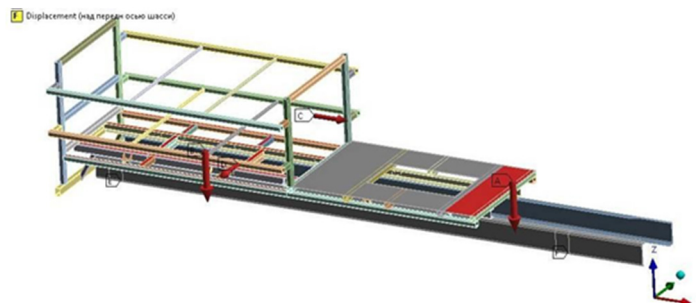


Рис. 14. Граничные условия, наложенные на модель надрамника (нагружение 4)

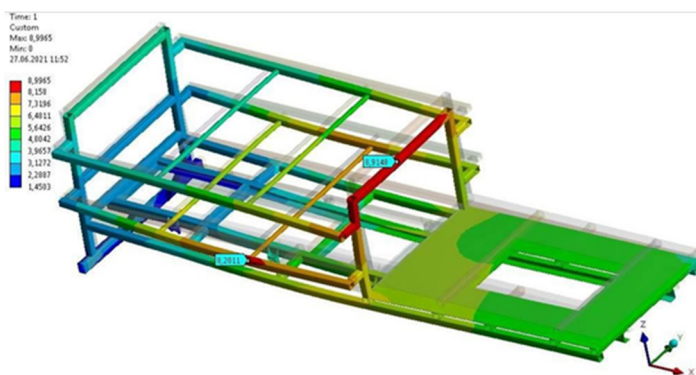


Рис. 15. Перемещения узлов модели надрамника (нагружение 4)

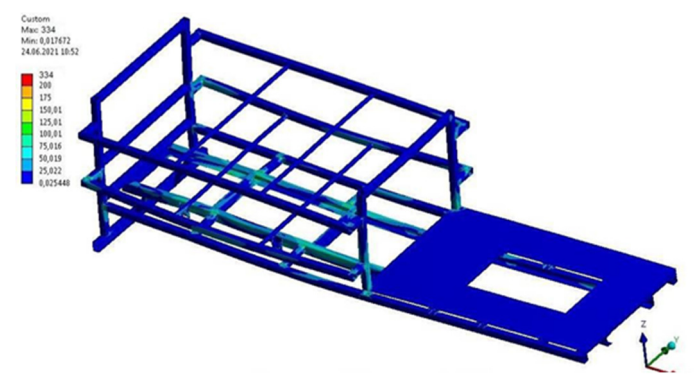


Рис. 16. Напряжения в элементах модели надрамника (нагружение 4)

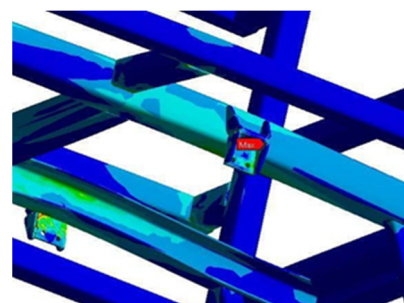


Рис. 17. Максимальные напряжения 334 МПа в элементах модели надрамника (нагружение 4)

Из данных эпюр следует, что максимальное перемещение узлов модели 8,20 мм наблюдается в боковой трубе – обвязке баков (сечение 80x80x6 мм), а также в передней трубе – обвязке баков 8,91 мм. Максимальное напряжение 334 МПа наблюдается в кронштейне надрамника в месте примыкания его к лонжерону.

Выводы

В ходе проведенных исследований по конструкции АПММ выполнен анализ технических решений по отдельным комплектующим элементам машины. По результатам анализа и обработки полученных данных было определено, что предлагаемая конструкция надрамника соответствует всем техническим требованиям.

С помощью ПО ANSYS Workbench 16.2 и модуля Static Structural авторами сформирована детализированная трёхмерная модель установки надрамника, с уточнением массогабаритных и функциональных характеристик оборудования.

Выполнены расчёты, подтверждающие работоспособность конструкции, результаты которого позволяют сформулировать вывод, что металлоконструкция надрамника соответствует требованиям прочности для всех видов нагружения (для стали 09Г2С). Выявлено, что максимальные перемещения возникают в трубах обвязки баков, а максимальные напряжения – в кронштейнах крепления надрамника к лонжеронам шасси.

В ходе проведения работ по формированию трехмерной модели выявлены возможности программного комплекса ANSYS для производства дальнейших расчетов при моделировании отдельных элементов аэродромной спецтехники, в том числе в области электрических машин, приводов, силовой электроники и др. [16-18] для продолжения исследований в рамках совместных проектов в области инженерного анализа, требующих участия специалистов из различных областей.

Литература

1. Федорова Н. Н., Данилов М. Н., Вальгер С. А. Основы работы в Ansys 17. М.: ДМК-Пресс, 2017. 210 с. ISBN: 978-5-97060-425-0
2. Морозов Е. М., Муїземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения, 2-е изд., испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. 456 с.
3. Ганькин Ю. А., Карелина М. Ю., Кравченко В. А., Яровой В. Г. Основы теории автотракторных двигателей. М.: Издательство РГАЗУ, 1997. 304 с.
4. Карелина М. Ю., Титов Н. В., Коломейченко А. В. и др. Импортозамещающая технология восстановления и упрочнения рабочего оборудования строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. 2015. № 8. С. 34-37.
5. Гриб В. В., Карелина М. Ю., Петрова И. М., Филлимонов М. А. Разработка алгоритма прогнозирования и мониторинга ресурса механических систем // Современные проблемы теории машин. 2013. № 1. С. 77-79.

6. Баловнев В. И., Данилов Р. Г. Поливомоечные машины // Строительные и дорожные машины. 2019. № 8. С. 3-9.
7. Абдулаев М. Н. Метод формирования и рационального использования парка машин дорожных организаций // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2012. № 4(31). С. 11-15.
8. Формалеев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 400 с.
9. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. М.: Мир, 1965. 456 с.
10. Walters D. K., Cokljat D. A. Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flows // Journal of Fluids Engineering. 2008. Vol. 130. No. 12, pp. 28.
11. Мочалов А. С., Каменских А. Д. Проект поворотной платформы для боковой разгрузки // Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Научная артель". 2021. С. 20-23.
12. Павлов С. А., Погонина А. М. Техника и технология содержания аэродромов в зимний период М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. 246 с.
13. Wang, Z., Zhao, J., & Zeng, G. Modeling, simulation and implementation of all terrain adaptive five DOF robot. Sensors, 22(18), doi:10.3390/s22186991
14. Мандровский К. П., Садовникова Я. С. Численное исследование влияния конструктивных и режимных параметров форсунок на характеристики процесса распыления противогололедных реагентов // Машиностроение и инженерное образование. 2019. № 1(58). С. 2-8.
15. Горяинова В. А., Чайкина А. А. Выбор средств механизации для пополнения парка аэродромной службы аэропорта // Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. С. 51-53.
16. Убанкин Е. И., Павликов С. Н., Чернопол М. Ю., Зимарева Е. А. Изменение структуры автоматизированной системы управления организацией воздушного движения в аэропорту // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 5. С. 36-45. DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-5-36-45. EDN YBXDUB.
17. Панков А. В., Крибель А. М., Лаута О. С., Васильев Н. А. Метод по совершенствованию информационно-аналитической работы на основе комплексирования результатов распознавания состояний объектов контроля с использованием методов машинного обучения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 27-35. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35. EDN AFFQVG.
18. Поспелов П. И., Таташев А. Г., Терентьев А. В. и др. Поток Бартлетта и математическое описание автотранспортных потоков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 34-41. DOI 10.36724/2409-5419-2021-13-6-34-41. EDN YALGIA.

3D MODELING IN THE ANSYS WORKBENCH SOFTWARE COMPLEX ON THE EXAMPLE OF AERODROME EQUIPMENT STRUCTURES CALCULATION

Evgeny V. Subachev, Spetsagregat Plant LLC, Miass, Russia, 777_sev@mail.ru

Dmitry A. Nikitin, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, d.nikitin@madi.ru

Vladimir S. Ershov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, vsershov21@gmail.com

Alexey A. Akulov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, a.akulov.98@mail.ru

Dmitry S. Taldykin, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, dima.dima.taldykin@mail.ru

Abstract

The use of modern computer technologies makes it possible to achieve high practical and economic results in various fields of industry. Information technologies used in design are also actively developing. There is an increasing number of various computer simulation programs. The article proposes a 3D model of the structure of a metal subframe with subsequent calculation of the loads acting on it in the ANSYS Workbench 16.2 software package using the Static Structural module. Loading diagrams are given and graphs of the movement of the structural unit under study are formed for four cases of movement of airfield special equipment. An analysis was made of the dynamic characteristics of the movement of the car and the coefficients of adhesion to the road, during which the numerical values suitable for the developed system were determined in order to calculate the contact and non-contact forces. In the course of research, for each type of movement, the numerical values of the loads along the three main axes were identified. Dangerous areas are indicated where cases of violation of the integrity of the structure are possible. On the basis of the data obtained, a conclusion was formed that allows developing the design of an airfield watering machine, while eliminating shortcomings and errors in the design of power units of equipment.

Keywords: ANSYS Workbench, airfield equipment, process equipment design, structural strength analysis.

References

1. Fedorova N. N., Danilov M. N., Valger S. A. (2017). Fundamentals of work in Ansys 17. Moscow: DMK-Press, 210 p. ISBN: 978-5-97060-425-0
2. Morozov E. M., Muizemnek A. Yu., Shadsky A. S. (2010). ANSYS in the hands of an engineer: Fracture mechanics. 2nd ed., rev. Moscow: LENAND. 456 p.
3. Gankin Yu. A., Karelina M. Yu., Kravchenko V. A., Yarovoy V. G. (1997). Fundamentals of the theory of autotractor engines. Moscow: RGAZU Publishing House. 304 p.
4. Karelina M. Yu., Titov N. V., Kolomeichenko A. V. et al. (2015). Import-substituting technology for the restoration and hardening of the working equipment of construction and road machines. *Construction and road machines*. No. 8, pp. 34-37.
5. Grib V. V., Karelina M. Yu., Petrova I. M. and Filimonov M. A. (2013). "Development of an algorithm for predicting and monitoring the resource of mechanical systems," *Sovremennyye problemy teorii mashin*. No. 1, pp. 77-79.
6. Balovnev V. I., Danilov R. G. (2019). Watering machines. *Construction and road machines*. No. 8, pp. 3-9.
7. Abdulaev M. N. (2012). The method of formation and rational use of the fleet of vehicles of road organizations. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. No. 4(31), pp. 11-15.
8. Formaleev V. F. and Reviznikov D. L. (2004). Numerical Methods. Moscow: FIZMATLIT. 400 p.
9. Green A. and Adkins J. (1965). Large Elastic Deformations and Nonlinear Continuum Mechanics. Moscow: Mir. 456 p.
10. Walters D. K., Cokljat D. A. (2008). Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds- Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flows. *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 130. No. 12, p. 28.
11. Mochalov A. S., Kamenskikh A. D. (2021). Project of a turntable for side unloading. *Limited Liability Company "Publishing House" Scientific Artel* ", pp. 20-23.
12. Pavlov S. A., Pogonina A. M. (2021). Technique and technology for maintaining airfields in winter, Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). 246 p.
13. Wang Z., Zhao J., Zeng G. Modeling, simulation and implementation of all terrain adaptive five DOF robot. *Sensors*, 22(18) doi:10.3390/s22186991
14. Mandrovskii K. P., Sadovnikova Ya. S. (2019). Numerical study of the effect: nozzles design and operating parameters on the spraying anti-icing reagents process characteristics. *Mashinostroyeniye i inzhenernoe obrazovanie*. No. 1 (58), pp. 2-8.
15. Goryainova V. A., Chaikina A. A. (2020). Choice of mechanization means for replenishment of the airport airfield service fleet. Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva, 2020. - S. 51-53.
16. Ubankin E. I., Pavlikov S. N., Chernovol M. Yu., Zimareva E. A. (2020). Changing the structure of the automated air traffic control system at the airport. *H&ES Research*. 2020. Vol. 12. No. 5, pp. 36-45. DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-5-36-45.
17. Pankov A. V., Kribel A. M., Laut O. S., Vasiliev N. A. (2022). A method for improving information and analytical work based on the integration results of states of control objects recognition using machine learning methods. *H&ES Research*. Vol. 14. No. 2. S. 27-35. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35.
18. Pospelov P. I., Tatashev A. G., Terentiev A. V. et al. (2021). Bartlett flows and mathematical description of motor traffic flows. *H&ES Research*. Vol. 13. No. 6, pp. 34-41. DOI 10.36724/2409-5419-2021-13-6-34-41.

Information about authors:

Evgeny V. Subachev, General Director, Spetsagregat Plant LLC, Miass, Russia

Dmitry A. Nikitin, Deputy Head of UNIR, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir S. Ershov, lecturer, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Alexey A. Akulov, lecturer, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Dmitry S. Taldykin, student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia