

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.
Электрон. журн. 2023. № 2. С. 58 – 68.

DOI:

Представлена в редакцию: 19.01.2023

Принята к публикации: 20.03.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621. 878

Определение нагрузок на установочные болты при опрокидывании машины с системой защиты ROPS

Ха Фыюк Чи, Медведева Ю.Н. *

* uliya@bmstu.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

В данной работе представлен расчет нагрузок на установочные болты кабины машины при ее опрокидывании. Расчёт проведен на ЭВМ в системе SolidWorks Motion. Новизна работы заключается в учёте демпфирующих свойств резиновых прокладок между кабиной и подкабинной рамой при определении кинематических параметров при опрокидывании машины.

Ключевые слова: установочные болты кабины, нагрузки на установочные болты, кабины с системой ROPS, опрокидывание машины.

Введение

Установочные болты, которые крепят кабину с оператором к подкабинной раме и удерживают ее при опрокидывании машины, являются важным элементом обеспечения безопасности. Для смягчения ударных нагрузок между кабиной и рамой вместе с болтами устанавливаются резиновые прокладки. Проверка сохранения целостности установочных болтов при опрокидывании машины производится при проведении натурных испытаний опытного образца. Предельные нагрузки на силовые элементы конструкции регламентированы ГОСТ ISO 3471-2015¹. Однако еще при проектировании машины важно правильно рассчитать нагрузки и убедиться, что установочные болты не разрушатся при ударе.

Поэтому целью работы стало расчетное определение механических нагрузок на установочные болты при опрокидывании машины.

Для расчета использована вычислительная система SolidWorks Motion, а также простые кинематические зависимости для подготовки исходных данных.

¹ ГОСТ ISO 3471-2015 Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания.

Расчёт нагрузок на установочные болты, соединяющие кабину с подкабинной рамой, без учёта демпфирующих свойств прокладок снижает точность результатов.

В данной работе представлен пример расчета ударной нагрузки на кабину одноковшового погрузчика ПК-40 и нагрузок на установочные болты с учетом демпфирующих свойств прокладок.

Работа состоит из 3 частей:

- Определение кинематических параметров при опрокидывании машины с системой защиты ROPS.
- Определение силы удара кабины о поверхность при опрокидывании.
- Определение механических нагрузок на установочные болты на основе расчетной силы удара.

1. Определение кинематических параметров при опрокидывании машины

Кинематический расчёт параметров удара кабины без демпфирования элементов защиты ROPS был проведён в работе [1]. В ней для определения параметров использовался программный комплекс SolidWorks Motion. Средствами SolidWorks Motion была создана упрощенная виртуальная модель одноковшового погрузчика ПК-40, показанная рис.1. Детали, незначительно влияющие на результат, были опущены. Важно было добиться точности массовых и геометрических характеристик погрузчика, которые зависят от металлоконструкций, двигателя, кабины, навесного оборудования. Кабина жёстко закреплена к раме машины.

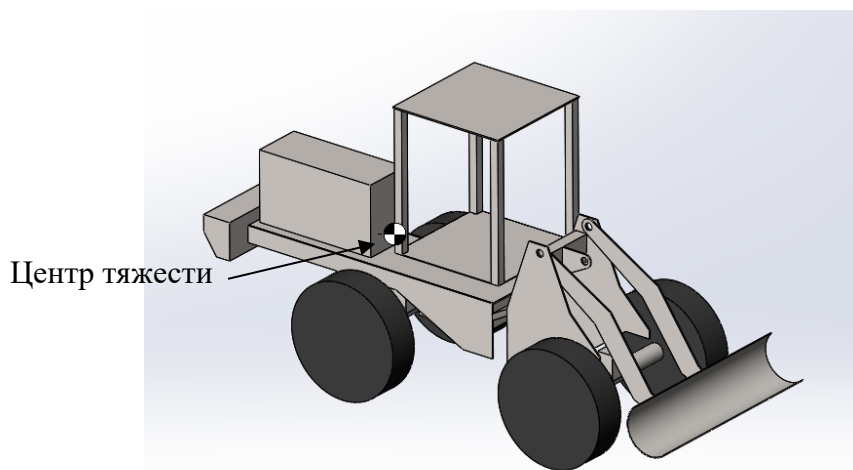


Рис. 1. Модель погрузчика ПК-40, выполненная в SolidWorks Motion (обозначен центр тяжести машины).

При определении кинематических параметров при опрокидывании программный комплекс SolidWorks Motion позволил учесть движение модели погрузчика по наклонной плоскости. Сборка модели и наклонной плоскости показана на рис. 2.

Для конфигурации модели погрузчика были найдены координаты центра масс машины. Критический угол, при котором машина опрокинется, можно найти по формуле:

$$\varphi = 90 - \arctan\left(\frac{H_c}{W/2}\right), \quad (1)$$

где H_c — высота центра масс машины над опорной поверхностью, W — ширина ходовой части машины.

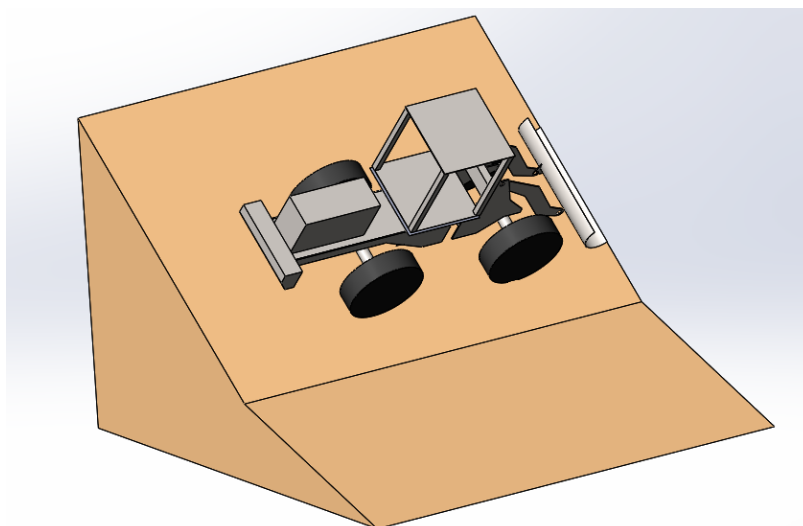


Рис. 1. Сборка погрузчика ПК-400 на уклоне, выполненная в SolidWorks Motion

Для погрузчика ПК-40 критический угол, рассчитанный по формуле (1), равен:

$$\varphi = 90 - \arctan\left(\frac{1570}{2240/2}\right) = 90 - 54,5 = 36,5^\circ.$$

Из-за упрощений, сделанных в модели погрузчика, его центр масс понизился по отношению к реальному положению. Поэтому критический угол уклона был увеличен до 41 градуса.

Для упрощения симуляции касание колёс не рассматривалось. При этом был выбран менее крутой уклон.

По результатам симуляции построены графики угловой скорости и ускорения в зависимости от времени, которые показаны на рис. 3а и 3б.

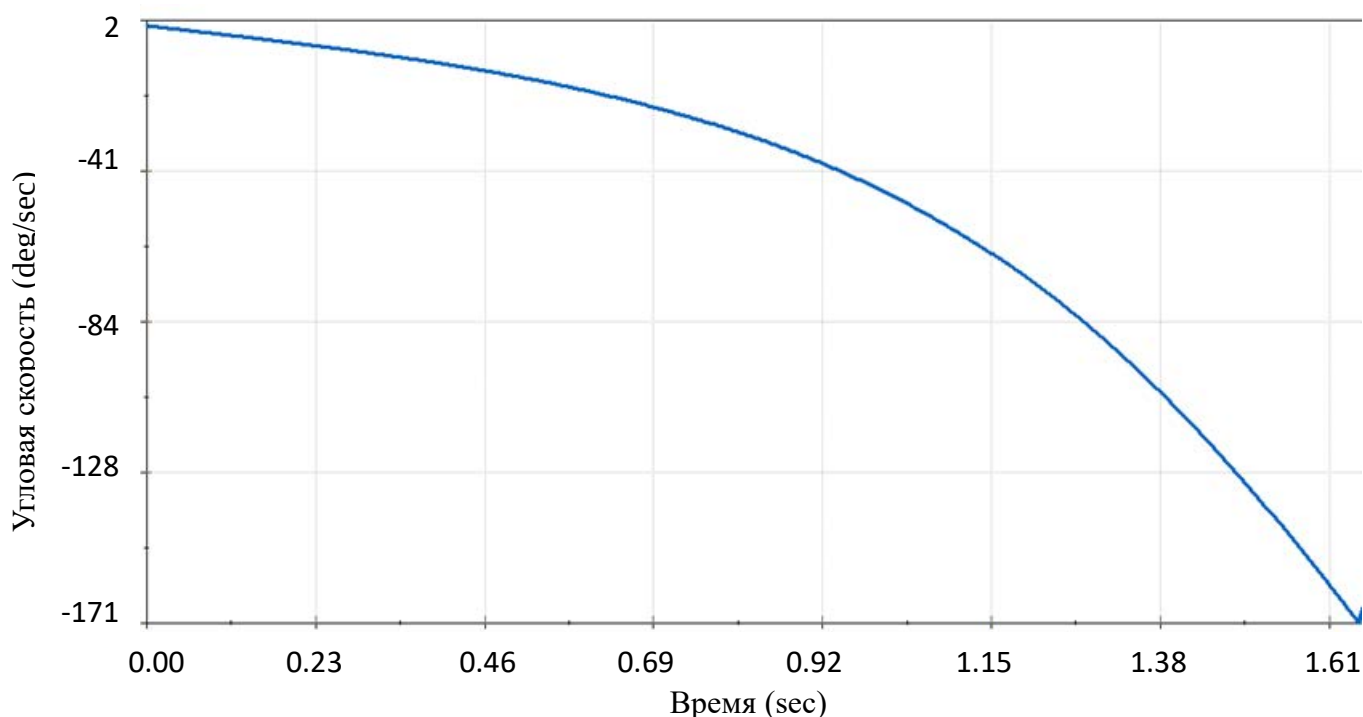


Рис. 2а. График угловых скоростей при опрокидывании машины без учёта демпфирования

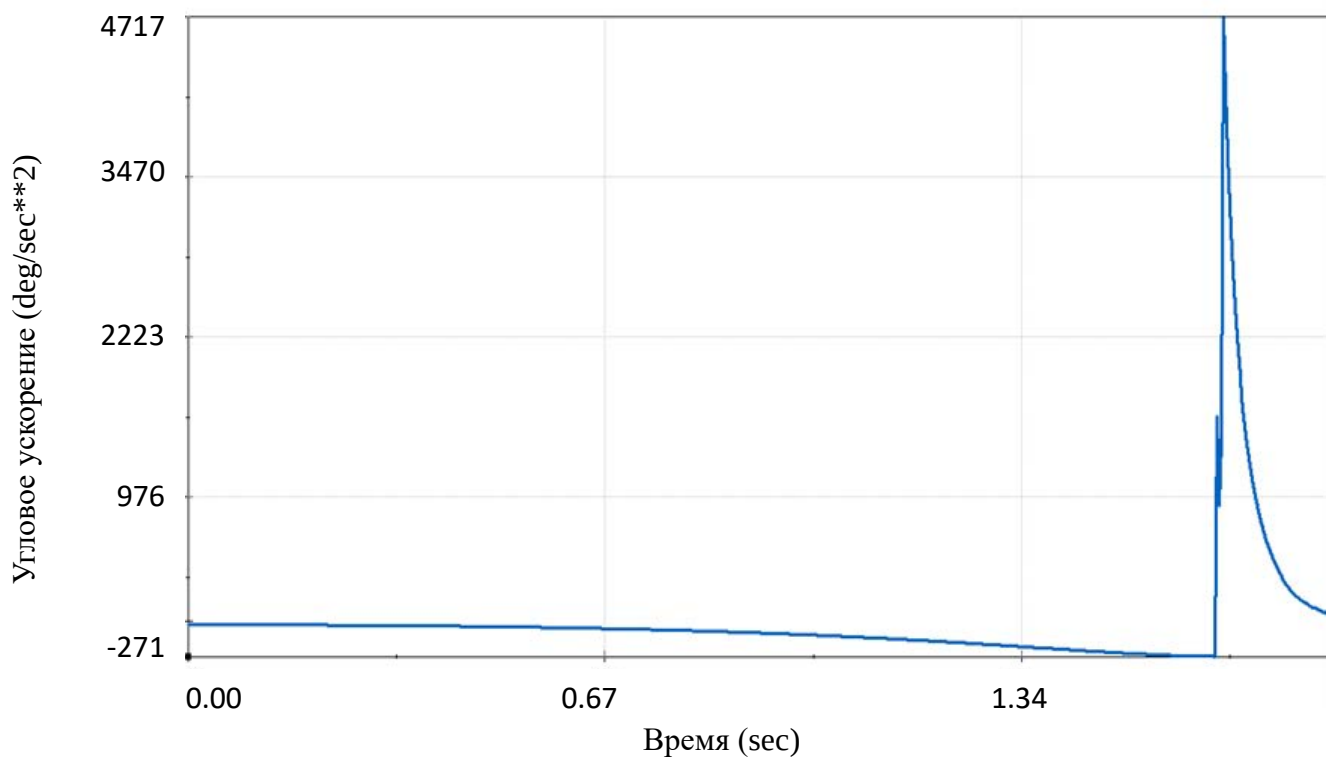


Рис. 3б. График угловых ускорений при опрокидывании машины без учёта демпфирования

Для целей настоящего расчетного исследования необходимо знание ускорения при ударе, график которого показан на рис. 3б. Однако данный результат получен без учёта демпфирования.

Для учета демпфирования использована схема, показанная на рис. 4.

По этой схеме демпферы реализованы в модели инструментом «пружина» с параметрами:

жѐсткость: 1600 Н/мм;

свободная длина 105 мм при начальном расстоянии 90 мм.

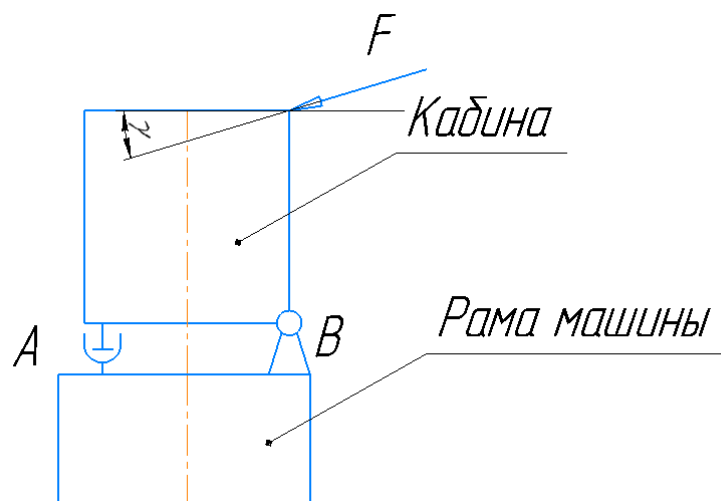


Рис. 4. Принципиальная схема работы демпферов в машине при опрокидывании

Проведя симуляцию после изменений, получим графики кинематических характеристик при опрокидывании машины, которые приведены на рис. 5а и 5б.

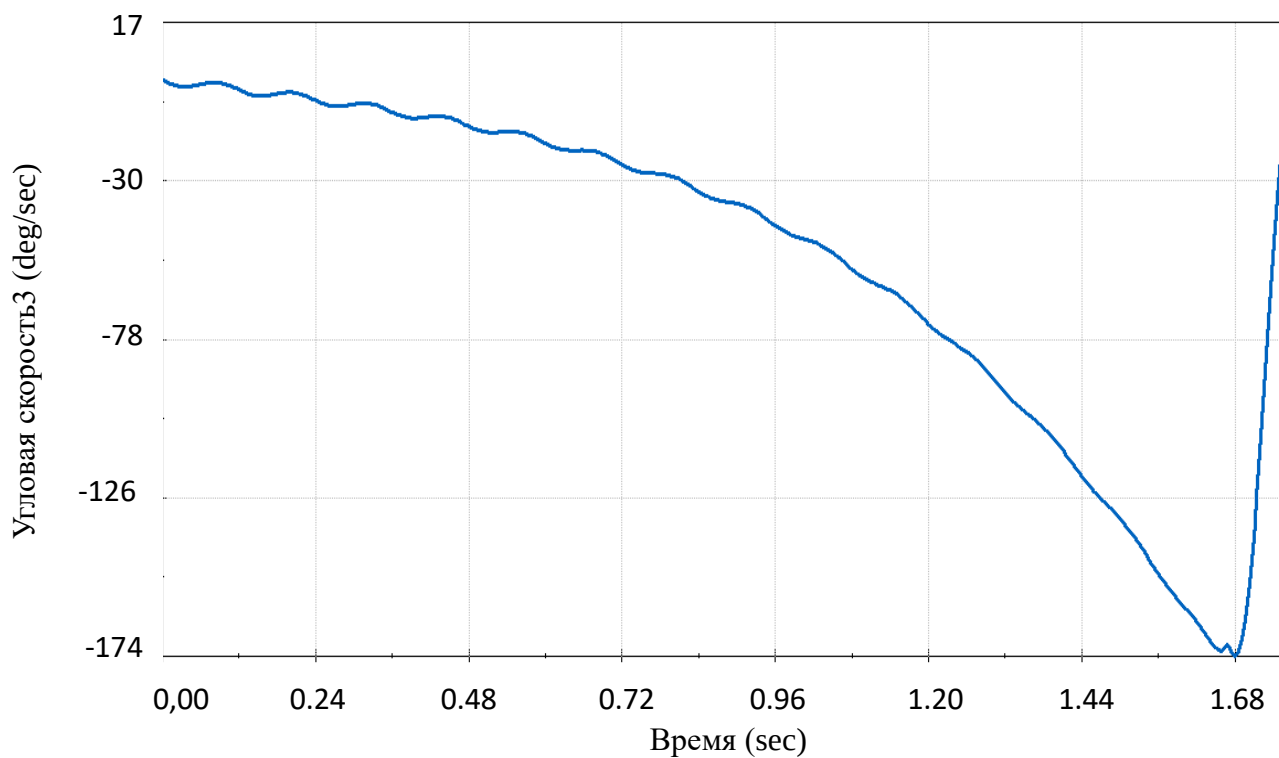


Рис. 5а. Графики угловых скоростей при опрокидывании машины с учётом демпфирования

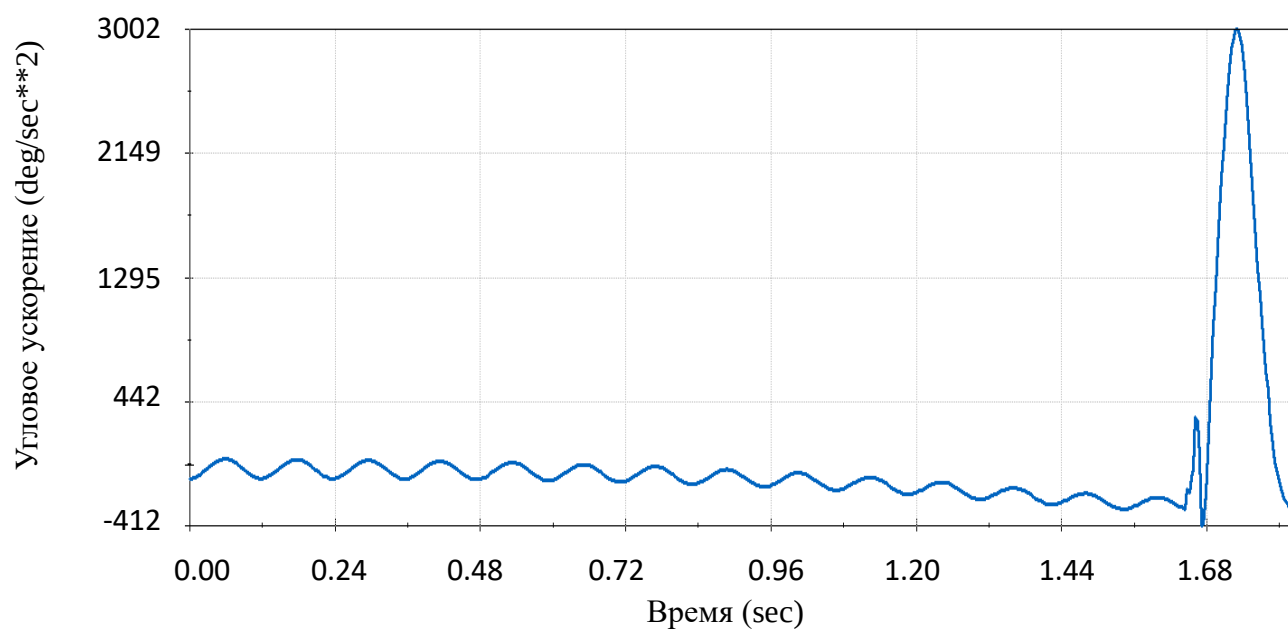


Рис. 6б. Графики угловых ускорений при опрокидывании машины с учётом демпфирования

2. Определение силы, приложенной к кабине при ударе о поверхность

Силу, приложенную к кабине во время удара при опрокидывании, по схеме, изображенной на рис. 6, можно определить по формуле, приведенной в работе [2] и в работе [1, формула 18]:

$$F = \frac{I_{Oz} * \varepsilon_2 + G * r_1 * \sin(\varphi_2)}{r_1 * \sin(\varphi_1) + r_2 * \sin(\gamma_1 + \gamma_2 - \varphi_1)} \quad , \quad (2)$$

где G - масса машины;

I_{Oz} - момент инерции машины относительно точки A в плоскости рис. 6;

ε_2 - угловое ускорение при опрокидывании машины;

φ_1 - угол между плоскостью уклона и горизонталью;

$\varphi_2 = \varphi_1 + \alpha$.

Однако эта формула не учитывает демпфирующие свойства резиновых прокладок.

Поэтому для нахождения фактической силы была проведена симуляция в программном комплексе SolidWorks.

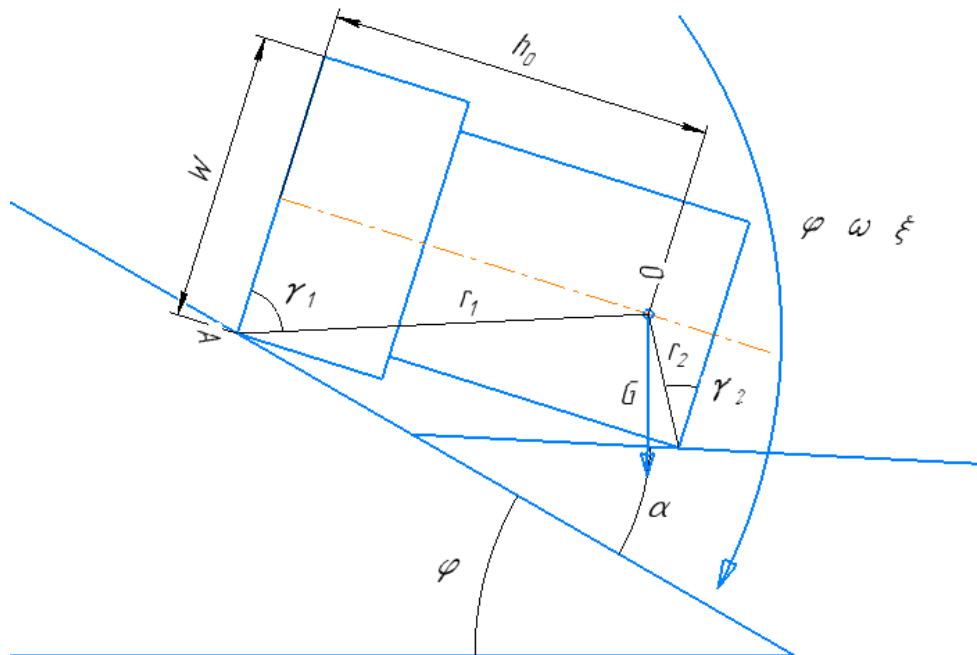


Рис. 7. Схема удара опрокинувшейся машины с системой защиты ROPS

3. Определение сил, действующих на установочные болты при опрокидывании машины

При неполном сжатии демпфирующей прокладки в точке A система действует по схеме на рис.4. Как только сжатие прекращается, точка A становится шарнирной опорой, и нагружается уже установочный болт в точке B . Схема изображена на рис. 7.

Вертикальное усилие от удара F_y почти полностью воспринимается демпфирующей прокладкой в точке B . Погрешности в результатах из-за пренебрежения углом наклона много меньше, чем напряжений на установочном болте.

Рассчитаем силы, растягивающие болт по схеме на рис.8.

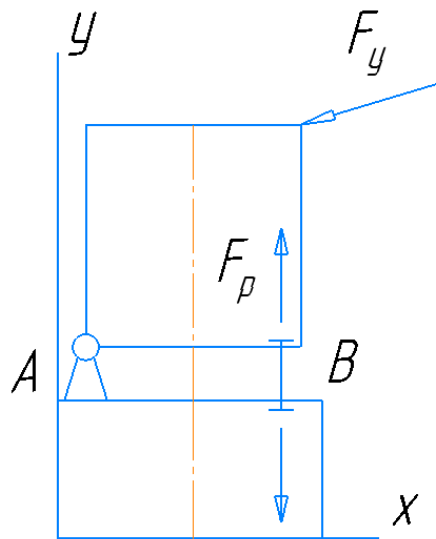


Рис. 8. Схема растяжения установочных болтов при полном сжатии прокладки

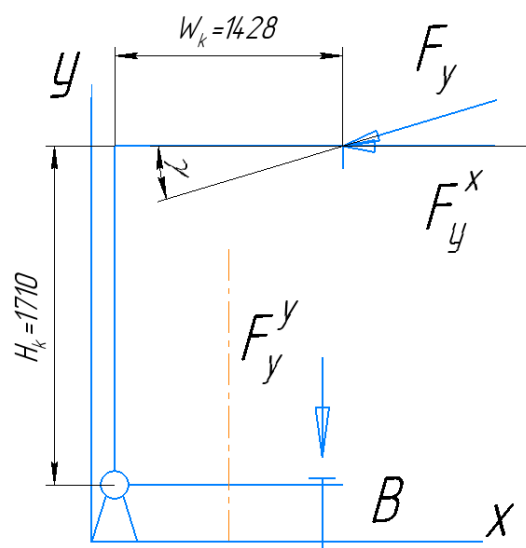


Рис. 9. Схема расчёта нагрузок на установочных болтах

Усилие растяжения на установочном болте будет равно:

$$F_6 = \frac{H_k}{W_k} F_y^x - F_y^y, \quad (3)$$

где

$$F_y^x = F_y * \cos(\gamma);$$

$$F_y^y = F_y * \sin(\gamma).$$

Эта формула позволяет определить значение силы для сравнения с нормативными критическими значениями для конкретной машины.

4. Результаты

Силу, приложенную к кабине погрузчика ПК-40 при ударе о поверхность, подсчитаем по формуле (2):

$$F_y = \frac{I_{oz} * \varepsilon_2 + G * r_1 * \sin(\varphi_2)}{r_1 * \sin(\varphi_1) + r_2 * \sin(\gamma_1 + \gamma_2 - \varphi_1)} =$$

$$= \frac{53003 * 82,30 + 131846 * 1.792 * \sin(1.2998)}{1.792 * \sin(1.0178) + 2.109 * \sin(0.5529 + 1.2998 - 1.0178)} = 1488822 \text{ Н},$$

где для погрузчика ПК-40 использованы данные из технического паспорта:

$G = 131846 \text{ Н};$

$r_1 = 1792 \text{ мм};$

$r_2 = 2109 \text{ мм};$

$\gamma_1 = 0,5529 \text{ рад};$

$\gamma_2 = 1,2998 \text{ рад};$

$\varphi_1 = 1.0178 \text{ рад};$

$\varphi_2 = 1,2998 \text{ рад};$

$I_{oz} = 53003 \text{ кг/м}^2.$

$\varepsilon_2 = 4717 \text{ град/с}^2 = 82,3 \text{ рад/с}^2$ – пиковое ускорение, найденное по рис. 3а.

Для определения момента инерции модели ПК-40 прибегнем к инструментам SolidWorks. Опрокидывание будем считать движением по окружности, относительно линии, соединяющей точки касания колес на уклоне. Результаты расчета показаны на рис. 9.

Угол между силой удара и горизонталью определяется геометрией и расположением машины. В данном случае $\gamma = 13^\circ$.

```

Масса = 13440.53 килограммов

Объем = 1.88 кубические метры

Площадь поверхности = 83.95 квадратных метры

Центр тяжести: ( метры )
  X = 1.56
  Y = 1.5
  Z = 1.14

Основные оси инерции и основные моменты инерции: ( килограммов * квадратные метры )
центр тяжести
  lx = ( 1, 0.09, 0)          Px = 4994.86
  ly = (-0.09, 1, 0.03)      Py = 29238.35
  lz = ( 0, -0.03, 1)        Pz = 31355.6

Моменты инерции: ( килограммов * квадратные метры )
Определяются в центре тяжести и выравниваются относительно системы координат вывода.
  Lxx = 5185.06              Lxy = 2138.65              Lxz = 50.23
  Lyx = 2138.65              Lyy = 29050.72             Lyz = 68.69
  Lzx = 50.23                Lzy = 68.69              Lzz = 31353.02

Моменты инерции: ( килограммов * квадратные метры )
Вычисляется с помощью системы координат вывода.
  lxx = 53003.05             lxy = 33591.48             lxz = 23871.74
  lyx = 33591.48             lyy = 79230.6              lyz = 23109.33
  lzx = 23871.74             lzy = 23109.33             lzz = 94303.01

```

Рис. 10. Моменты инерции модели погрузчика ПК-40, полученные в SolidWorks (ось ox - совпадает с осью вращения при опрокидывании)

Для оценки силы при учёте демпфирующих свойств, воспользуемся инструментом построения эпюр для пружин («сила воздействия») и для погрузчика ПК-40 рассчитаем усилие, равное:

$$F_y^x = 69,8 \text{ кН, тогда}$$

$$F_y^y = 14,5 \text{ кН;}$$

$$F_y^z = 71,28 \text{ кН.}$$

5. Обсуждение

Значение силы, действующей на установочный болт погрузчика ПК-40, превышает на 15% нормативное значение по ГОСТ ISO 3471-2015. Однако данный результат не учитывает количество энергии, поглощаемой защитным устройством при упругопластическом деформировании, и может быть уточнен.

Заключение

Для проведения настоящего исследования в среде SolidWorks Motion была создана приближенная модель погрузчика ПК-400 в двух вариантах. В первом варианте кабина была жёстко прикреплена к раме, во втором – были использованы соединения с упругими элементами (резиновыми прокладками).

Уклон поверхности касания колес модели соответствовал наибольшему уклону, при превышении которого погрузчик опрокинется под действием силы тяжести.

По результатам моделирования в среде SolidWorks Motion установлено, что при использовании резиновых прокладок пиковое угловое ускорение в 1,57 раза ниже, нежели без них, так как прокладки демпфировали удар, растягивая время передачи энергии, что уменьшило амплитуду.

Нагрузки при опрокидывании погрузчика оценивались методами механики с элементами теории удара, без учета пластической деформации установочных болтов.

Поэтому для адекватной оценки эффективности устройства защиты на стадии проектирования и проверки соответствия энергопоглощающих свойств конструкции нормативным требованиям безопасности, математическая модель должна обеспечивать возможность определения количества энергии, поглощаемой защитным устройством при упругопластическом деформировании.

Список литературы

1. Ха Ф. Определение параметров удара при опрокидывании кабины ROPS / Ф. Ха // Международная научно-техническая конференция «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022». – 2022. – № 1. – С. 140-149.
2. Скобцов И.Г. Разработка расчётных методов оценки безопасности оператора в экстремальных ситуациях работы лесных машин: дис. на соиск. уч. степ. доктора технических наук: специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок» - Петрозаводск, 2015. - 221 с.
3. ГОСТ ISO 3471-2015 Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания.

АВТОРЫ

Ха Фыок Чи, студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, fiokchi@mail.ru

Юлия Николаевна Медведева, ассистент кафедры РК-4 «Подъемно-транспортные системы»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, uliya@bmstu.ru

Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal
International Public Organization
"Integration strategy"
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants: Design and Exploiting.
2023. № 2. pp. 58 – 68.*

DOI:

Received: 19.01.2023

Accepted for publication: 20.03.2023

© International Public Organization "Integration strategy"

Determination of stresses on set bolts during rollover of a ROPS machine

Kha Fyok Chi,
Yulia N. Medvedeva *

* uliya@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation

This paper presents the calculation of the loads on the mounting bolts of the cab of the car when it overturns. The calculation was carried out on a computer in the SolidWorks Motion system. The novelty of the work consists in taking into account the damping properties of the rubber gaskets between the cab and the cab frame when determining the kinematic parameters when the machine is overturned.

Keywords: cab mounting bolts, loads on mounting bolts, cabs with ROPS system, overturning of the machine.

References

1. Ha F. Determination of impact parameters when overturning the ROPS cabin / F. Ha // International Scientific and Technical Conference "INTERSTROYMEH-2022". – 2022. – № 1. – Pp. 140-149.
 2. Skobtsov I.G. Development of computational methods for assessing operator safety in extreme situations of forest machinery operation: dis. Dr. Technology and machines of logging and Forestry sciences: 05.21.01. - Petrozavodsk, 2015. - 221 p.
 3. GOST 3471-2015 "Machines earthmoving protection devices IN case OF overturning Technical requirements and laboratory tests"
-

AUTHORS

Kha Fyok Chi, Student of Bauman Moscow State Technical University, fiokchi@mail.ru

Yulia Nikolaevna Medvedeva, Assistant of the Department "Lifting and Transport Systems" of Bauman Moscow State Technical University, uliya@bmstu.ru