

УДК 629.366

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Макаров Владимир Сергеевич
д.т.н., доцент
Web of Science ResearcherID: B-2739-2014
Scopus Author ID: 55871122000
РИНЦ SPIN-код: 9834-6239
E-mail: makvl2010@gmail.com

Бутин Данила Александрович
к.т.н.
Scopus Author ID: 57190386175
РИНЦ SPIN-код: 6233-5202
E-mail: danila.butin@ntnu.ru
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24

В статье рассматривается необходимость увеличения поперечной устойчивости грузовых автомобилей в том числе используемых в сельском хозяйстве. Одним из способов является оптимизация конструкции стабилизаторов поперечной устойчивости. Для этого на стадии проектирования необходимо провести виртуальные испытания. В статье рассмотрен пример расчетов для грузовой машины полной массой до 15 тонн. Для расчетов использован программный комплекс MSC Adams Car. Расчеты выполнены с учетом требований поперечной статической устойчивости по ГОСТ 31507—2012 для машин рассматриваемого типа. Проанализировано влияние конструкции и размеров стабилизаторов, устанавливаемых на передней и задней осях на угол статической устойчивости. Получены табличные данные комплексного влияния диаметров стабилизаторов на предельный угол устойчивости машины. Приведены графики зависимостей изменения угловой жесткости подвески переднего и заднего мостов в зависимости от диаметра установленного стабилизатора. Даны эскизы рекомендуемых конструкций стабилизаторов. В дальнейшем будет разработана конструкторская документация и проведены уточняющие расчеты с учетом особенностей реальной конструкции

Ключевые слова: ПОПЕРЕЧНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ, ГРУЗОВОЙ АВТОМОБИЛЬ, СТАБИЛИЗАТОР ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-194-021>

<http://ej.kubagro.ru/2023/10/pdf/21.pdf>

UDC 629.366

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

STUDY OF STATIC LATERAL STABILITY OF A TRUCK

Makarov Vladimir Sergeevich
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Web of Science ResearcherID: B-2739-2014
Scopus Author ID: 55871122000
RSCI SPIN-code: 9834-6239
E-mail: makvl2010@gmail.com

Butin Danila Alexandrovich
Candidate of Technical Sciences
Scopus Author ID: 57190386175
RSCI SPIN-code: 6233-5202
E-mail: danila.butin@ntnu.ru
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina, 24

The article discusses the need to increase the lateral stability of trucks, including those used in agriculture. One way is to optimize the design of anti-roll bars. To do this, it is necessary to conduct virtual tests at the design stage. The article discusses an example of calculations for a truck with a gross weight of up to 15 tons. The MSC Adams Car software package was used for calculations. Calculations were performed taking into account the requirements of lateral static stability in accordance with GOST 31507-2012 for machines of the type in question. The influence of the design and dimensions of stabilizers installed on the front and rear axles on the angle of static stability is analyzed. Tabular data on the complex influence of stabilizer diameters on the maximum stability angle of the machine were obtained. Graphs of changes in the angular stiffness of the suspension of the front and rear axles depending on the diameter of the installed stabilizer are presented. Sketches of recommended stabilizer designs are given. In the future, design documentation will be developed and clarifying calculations will be carried out taking into account the features of the actual design

Keywords: LATERAL STABILITY, TRUCK, ANTI-ROLL BAR

Введение

Грузовые автомобили широко применяются в сельском и народном хозяйстве, а также является одним из крупнейших в обслуживающем подкомплексе агропромышленного комплекса (АПК). [1] Он позволяет осуществлять перевозки сельхозпродукции от мест сбора, до места переработки продукции. В сельском хозяйстве большинство перевозок осуществляется под открытым небом, и зависит от дорожно-грунтовых условий, состояния почвы и климатических условий. Примерно половина территории России имеет горные массивы и возвышенности. Многочисленные этносы, проживающие на горных территориях, демонстрируют образцы пластичной адаптации человека к сложным условиям окружающей среды. Несмотря на то, что во многом рассматриваемые территории являются «зонами рискованного земледелия», сельское хозяйство там развивается. При перевозках грузов по дорогам с разными величинами уклонов важным является обеспечение требуемого уровня поперечной статической устойчивости грузовых автомобилей. Этого можно добиться путем правильной установки дополнительных стабилизаторов поперечной устойчивости на осях грузовой машины. Поэтому в данной статье рассмотрим методику расчета влияния стабилизаторов поперечной устойчивости на устойчивость грузовых автомобилей.

Избежать неблагоприятных последствий для грузовых машин занятых в сельскохозяйственных перевозках можно путем установки дополнительных стабилизаторов поперечной устойчивости на мостах транспортного средства. Поэтому в данной статье рассмотрим пример расчета статической поперечной устойчивости грузового автомобиля полной массой до 15 тонн. Изначально на прототип рассматриваемой

машины был меньшей массы (12 тонн) и не имел стабилизатора поперечной устойчивости переднего моста.

Необходимо отметить, что исследования поперечной устойчивости грузовых автомобилей были проведены и ранее. Так в классической литературе [2] приводятся аналитические зависимости, но они не учитывают влияние стабилизаторов поперечной устойчивости. В работе [3] это исправлено. Расчеты проведены в MSC Adams Car, но они проведены для машины с жесткой рамой, а как показали работы [4] чем больше угловая жесткость несущей системы автомобиля, тем выше показатели управляемости и устойчивости к поперечному опрокидыванию.

Рассмотрим далее методику расчета на конкретном примере.

Требование нормативных документов

Для выполнения требований поперечной статической устойчивости по ГОСТ 31507-2012 [5] необходимо, чтобы угол статической устойчивости α_H и угол крена поддресоренных масс φ_H находились в пределах нормативов.

$$q_s > 1; \alpha_H = (15 + 25q_s)^\circ;$$

$$0,55 \leq q_s \leq 1; \alpha_H = (-2,4 + 42,4q_s)^\circ;$$

$$q_s < 0,55; \alpha_H \geq 21^\circ.$$

$$q_s \leq 1; \varphi_H = (10,8 - 4,3q_s)^\circ;$$

$$q_s > 1; \varphi_H = 6,5^\circ.$$

Коэффициент поперечной статической устойчивости q_s определяется по формуле:

$$q_s = \frac{0,5b}{h},$$

где: b – колея машины, мм; h – высота центра масс, мм.

Высота центра масс рассчитывается по зависимости:

$$h = \frac{0,5b - h_{\text{кп}} \cdot \tan \alpha - \Delta}{\tan \alpha \cdot \cos \varphi + \cos \varphi},$$

где: $h_{кп}$ - высота оси крена в поперечном сечении, мм; Δ - боковое смещение центра масс, мм; α - угол статической устойчивости, град; φ - угол крена подрессоренных масс, град.

При проведении исследований оценивалось одновременное влияние стабилизаторов поперечной устойчивости. Угловая жесткость подвесок изменялась с целью выполнения требований испытания статической поперечной устойчивости «Опрокидывание на стенде» по ГОСТ 31507-2012.

Описание математической модели

Моделирование автомобиля было осуществлено в среде MSC Adams Car. При моделировании стабилизаторы поперечной устойчивости были установлены снаружи колесной базы. Как это принято на грузовых автомобилях. Установленные стабилизаторы поперечной устойчивости изображены на Рис. 1. Имитационная модель стабилизатора представляет из себя торсион стабилизатора, рычаги и стойки. Торсион выполнен из конечных элементов «Beam», а рычаги и стойки из недеформируемых элементов «Line». В исследовании, диаметр стабилизаторов варьировался от 0 до 60 мм.

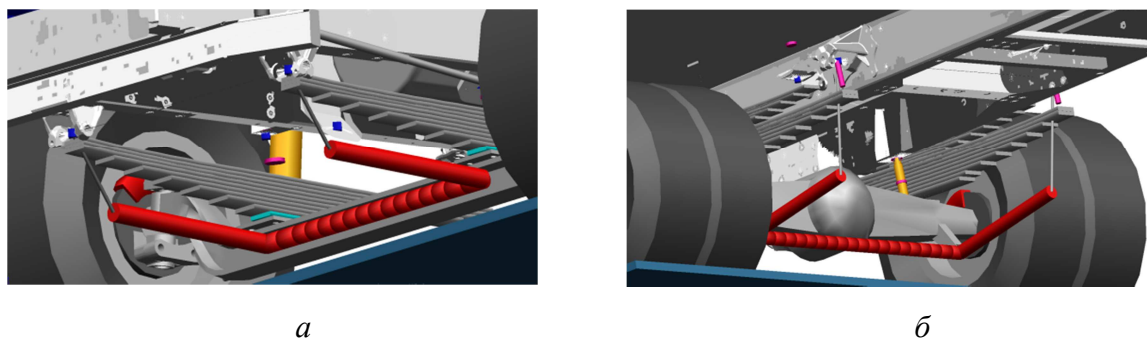


Рис. 1 –Стабилизаторы поперечной устойчивости установленные на модель автомобиля: а) – передняя ось; б) – задняя ось

На рис. 2 показана математическая модель машины во время виртуального исследования поперечной статической устойчивости на

стенде. Угол статической устойчивости - это критический угол при котором происходит отрыв всех колес одного борта.

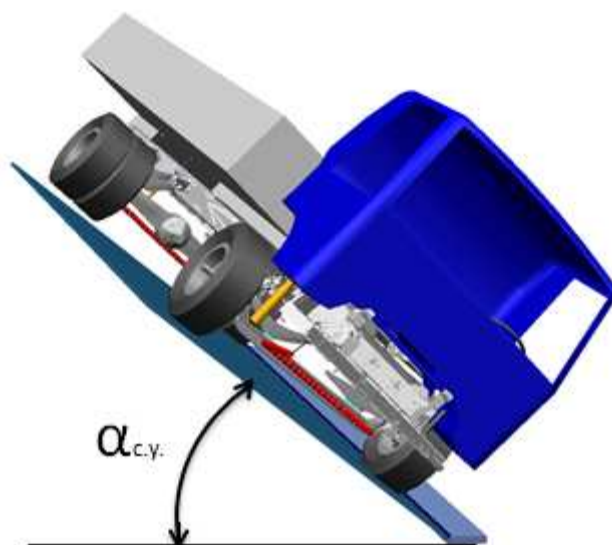


Рис. 2 – Моделирование испытания «Опрокидывание на стенде»

Определение параметров статической устойчивости

Результаты эксперимента даны в таблице 1.

Табл. 1. Результаты определения угла статической устойчивости в зависимости от диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости

Угол статической устойчивости, град					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	33,59	33,64	33,72	34,58	34,53
20	33,64	33,72	34,32	34,61	34,59
40	34	34,26	34,69	34,96	34,95
60	34,32	34,39	35,02	35,2	35,28

Коэффициент поперечной статической устойчивости рассчитывается по зависимостям из [5]. Результаты моделирования даны в таблице 2.

Табл. 2. Коэффициент поперечной статической устойчивости в зависимости от диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости

Коэффициент поперечной статической устойчивости					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	0,90	0,90	0,91	0,85	0,83
20	0,91	0,91	0,87	0,85	0,84
40	0,91	0,87	0,87	0,85	0,84
60	0,91	0,90	0,88	0,85	0,84

Нормативный угол статической устойчивости рассчитывался по зависимостям из [5] по коэффициентам поперечной статической устойчивости. Результаты моделирования даны в таблице 3.

Табл. 3. Нормативный угол статической устойчивости в зависимости от диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости

Нормативный угол статической устойчивости, град					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	35,9	35,9	36,0	33,7	33,0
20	36,0	36,0	34,6	33,8	33,0
40	36,0	34,6	34,7	33,8	33,2
60	36,0	35,9	34,7	33,7	33,2

Данные расчета по сравнению углов статической устойчивости с нормируемыми углами статической устойчивости по ГОСТ31507-2012 представлены в таблице 4. Где знаком «+» отмечены варианты диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости, при которых угол статической устойчивости удовлетворяет требованиям, а «-» отмечены варианты, не удовлетворяющие требованию.

Табл. 4 Варианты стабилизаторов поперечной устойчивости, удовлетворяющие требованию по углу статической устойчивости

Варианты стабилизаторов удовлетворяющие требованию по углу статической устойчивости					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	-	-	-	+	+
20	-	-	-	+	+
40	-	-	+	+	+
60	-	-	+	+	+

По результатам виртуальных исследований видно, что модель автомобиля без стабилизаторов поперечной устойчивости не выполняет требование по углу статической устойчивости. Требования поперечной статической устойчивости по углу статической устойчивости удовлетворяют модели с диаметром переднего и заднего стабилизатора от 40 мм.

На Рис. 3 показана модель машины во время виртуального исследования поперечной статической устойчивости на стенде при определении уголков крена подрессоренной массы, в момент критического угла при котором происходит отрыв всех колес одного борта. Результаты исследования с углами крена подрессоренной массы представлены в таблице 5.

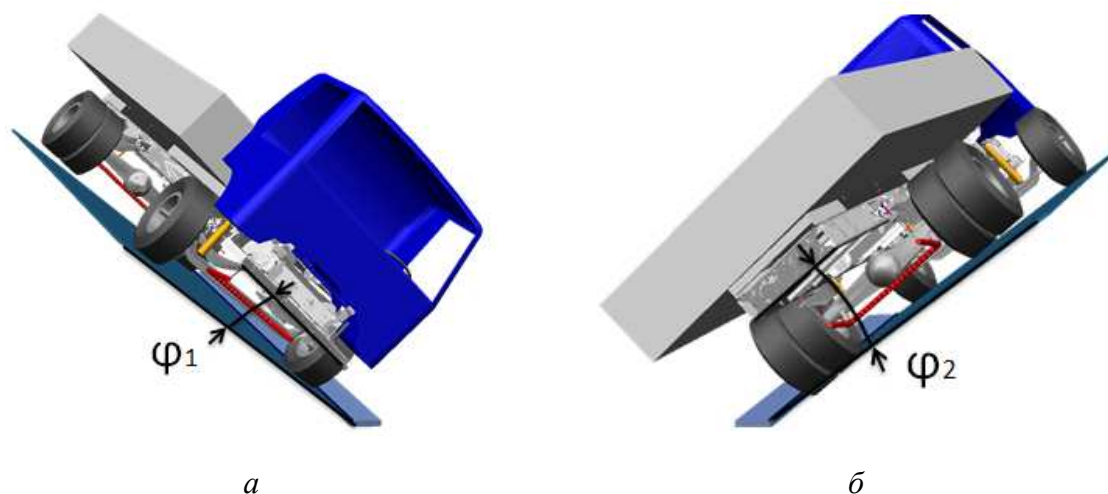


Рис. 3 – Угол крена передней и задней поперечин рамы: а) поперечина передняя; б) поперечина задняя

Средние значения углов крена подпрессоренных масс в центре масс определяют по формуле:

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\varphi_1 l_1 + \varphi_2 l_2}{l_1 + l_2},$$

где: где l_1 – расстояние от переднего сечения, в котором проводят измерение крена, до центра масс; l_2 – расстояние от заднего сечения, в котором проводят измерение крена, до центра масс машины; φ_1 – угол крена передней поперечины рамы, град; φ_2 – угол крена задней поперечины рамы, град.

Табл. 5. Результаты определения угла крена подпрессоренной массы в зависимости от диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости

Угол крена, град					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	12,3	12,1	12,2	7,4	6,4
20	12,2	12,2	9,1	7,4	6,4
40	11,6	9,2	8,5	6,8	6,0
60	11,2	10,9	8,1	6,3	5,5

Нормативный угол крена подрессоренной массы рассчитывался по уравнениям из ГОСТ 31507-2012 по коэффициентам поперечной статической устойчивости. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Табл. 5. Нормативный угол крена подрессоренной массы в зависимости от диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости

Нормативный угол крена, град					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	6,91	6,92	6,90	7,13	7,21
20	6,91	6,90	7,04	7,13	7,21
40	6,91	7,04	7,04	7,13	7,19
60	6,90	6,91	7,04	7,14	7,19

Результаты сравнения углов крена с нормируемыми углами крена по ГОСТ 31507-2012 представлены в таблице 6. Где знаком «+» отмечены варианты диаметров стабилизаторов поперечной устойчивости, при которых угол крена удовлетворяет требованиям, а «-» отмечены варианты, не удовлетворяющие требованию.

Табл. 6. Варианты стабилизаторов поперечной устойчивости, удовлетворяющие требованию по углу крена подрессоренной массы

Варианты стабилизаторов удовлетворяющие требованию по углу крена подрессоренной массы					
Диаметр заднего стабилизатора, мм	Диаметр переднего стабилизатора, мм				
	0	20	40	50	60
0	-	-	-	-	+
20	-	-	-	-	+
40	-	-	-	+	+
60	-	-	-	+	+

По результатам виртуальных исследований видно, что модель автомобиля без стабилизаторов поперечной устойчивости не выполняет требование по углу крена. Требования поперечной статической устойчивости по углу крена удовлетворяют модели с диаметром стабилизаторов поперечной устойчивости переднего от 50 мм, а заднего от 40 мм.

Для выполнения требований необходимо, чтобы удовлетворялись оба условия по углу статической устойчивости и крена подрессоренной массы. Из результатов исследований видно, что минимальный диаметр стабилизаторов, позволяющих выполнить требования испытания по статической поперечной устойчивости ГОСТ 31507-2012 для переднего моста 50 мм, а для заднего 40 мм.

Определение угловой жесткости подвесок.

Определение угловой жесткости подвесок передней и задней оси проводилось с целью определения характеристик подрессоривания осей, позволяющих выполнить требования по поперечной статической устойчивости. Моделирование поперечного крена автомобиля на стенде осуществляется следующим методом. Создавая вертикальное нагружение на колесо одного борта, при одновременном разгрузении другого борта, с постоянной суммой вертикальных сил на обеих площадках происходит процесс с перераспределением нагрузок и работой подвески аналогично тому что происходит при крене.

Определение угловой жесткости подвески передней оси производилось на виртуальном стенде Рис. 4. Во время исследования вместо рамы автомобиля выступает воображаемый неподвижный стапель. Колеса опираются на площадки с приводами осуществляющие вертикальное перемещение.

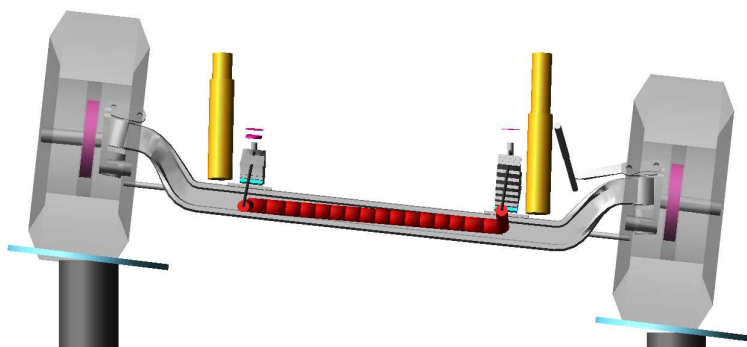
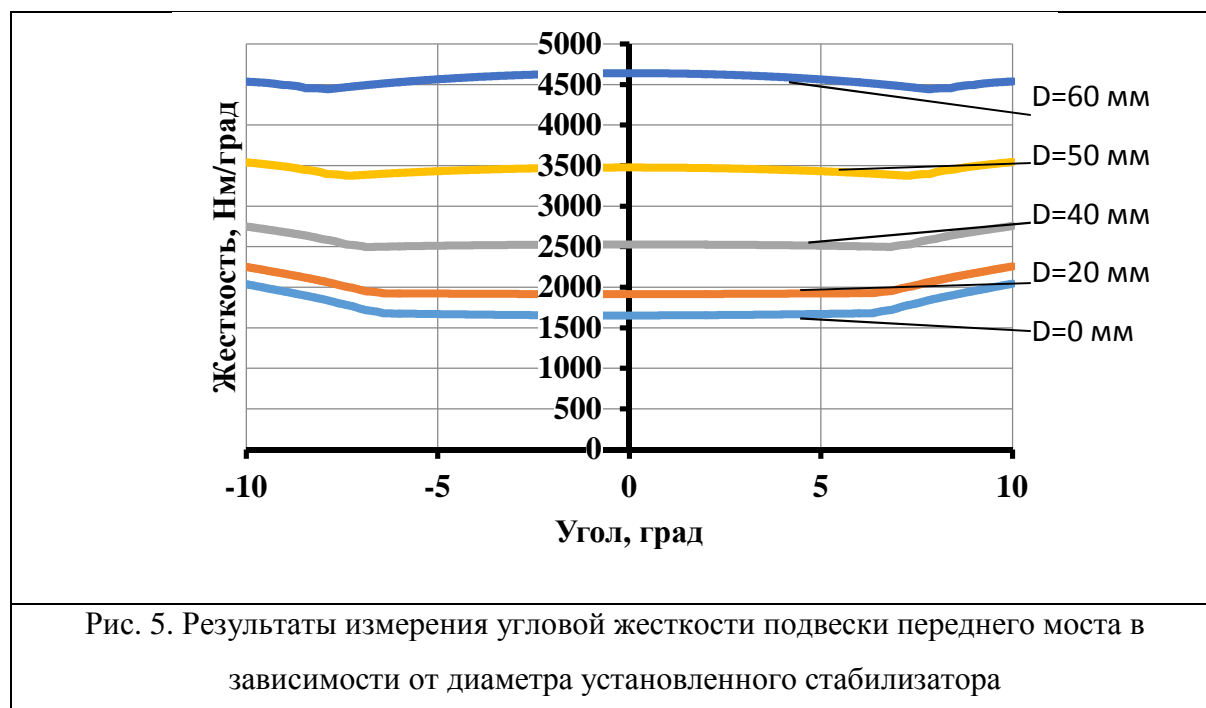


Рис. 4 - Подвеска передней оси на стенде измерения угловой жесткости

Результаты исследования угловой жесткости подвески передней оси представлены на Рис.5. Из графиков видно, что угловая жесткость передней оси без стабилизаторов поперечной устойчивости составляла около 1600 Нм/град, а со стабилизатором поперечной устойчивости обеспечивающий выполнения требований по поперечной статической устойчивости, диаметром 50 мм угловая жесткость составляла 3500 Нм/град.



Определение угловой жесткости подвески задней оси производилось на виртуальном стенде Рис. 6. Во время исследования вместо рамы автомобиля выступает воображаемый неподвижный стапель. Колеса опираются на площадки с приводами осуществляющие вертикальное перемещение.

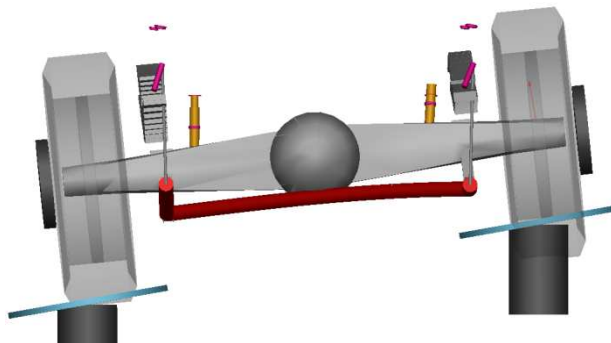


Рис. 6. Подвеска задней оси на стенде измерения угловой жесткости

Результаты исследования угловой жесткости подвески задней оси представлены на Рис.7. Из графиков видно, что угловая жесткость задней оси без стабилизаторов поперечной устойчивости составляла около 6500 Нм/град, а со стабилизатором поперечной устойчивости обеспечивающий выполнения требований по поперечной статической устойчивости, диаметром 40 мм угловая жесткость составляла около 7300 Нм/град.

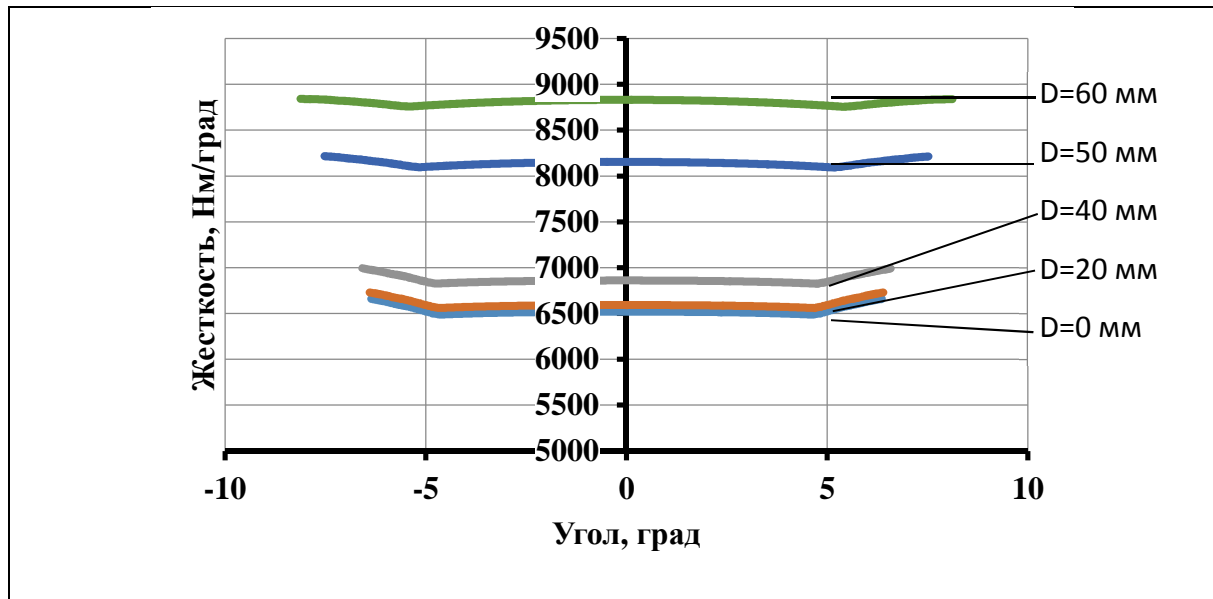


Рис. 7. Результаты измерения угловой жесткости подвески заднего моста в зависимости от диаметра установленного стабилизатора

Определение размеров и материалов стабилизаторов поперечной устойчивости

Поскольку модели стабилизаторов поперечной устойчивости были выполнены не упругими телами, а элементными телами с упругими связями, получить напряжения при их работе на прямую не получается. Для этого были измерены геометрические размеры стабилизаторов по углу закрутки рассчитывались напряжения в торсионах стабилизаторов.

Эскизы стабилизаторов передней и задней оси представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

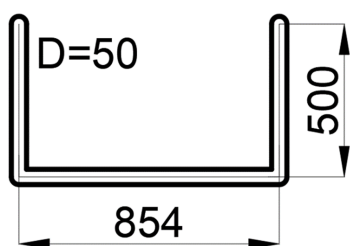


Рис. 8. Эскиз стабилизатора поперечной устойчивости передней оси



Рис. 9. Эскиз стабилизатора поперечной устойчивости задней оси

Максимальные углы закрутки стабилизаторов поперечной устойчивости передней и задней подвески при проведении исследований по поперечной статической устойчивости рис. 10 и 11 соответственно.

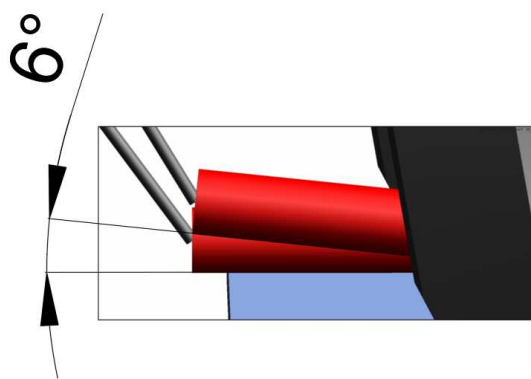


Рис. 10 - Максимальный угол закрутки стабилизатора поперечной устойчивости переднего моста при испытаниях, диаметр 50 мм

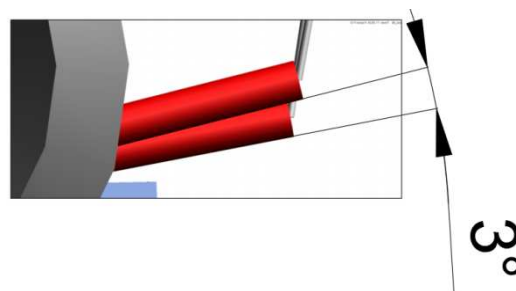


Рис. 11 - Максимальный угол закрутки стабилизатора поперечной устойчивости заднего моста при испытаниях, диаметр 40 мм

Максимальные касательные напряжения рассчитываются по формуле:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_p},$$

где: τ – максимальное касательное напряжение, Мпа; T - крутящий момент, Нм; W_p - полярный момент сопротивления.

Максимальные касательные напряжения в торсионе стабилизатора поперечной устойчивости передней оси $\tau_{\max} = 238$ Мпа, в торсионе стабилизатора поперечной устойчивости задней оси $\tau_{\max} = 80$ Мпа. По касательным напряжениям подходит сталь с допустимым касательным напряжением 240 МПа. Это сталь 35ХМ с термообработкой М50, (Сталь 35ХМ (М50) $[\tau]^{III} = 240$ МПа).

Выводы

Для исследуемого грузового автомобиля полной массой до 15 тонн стабилизаторы поперечной устойчивости на передней и задней подвеске необходимы для выполнения требований статической устойчивости автомобиля по ГОСТ 31507—2012. Для прохождения требований достаточно увеличить угловую жесткость передней оси на 1824 Нм/град, а задней оси на 842Нм/град. При расчете были выбраны стабилизаторы, удовлетворяющие требованиям по угловой жесткости, компоновочным и прочностным характеристикам. Передний стабилизатор диаметром 50мм, шириной 854мм и длиной плеч 500мм; задний стабилизатор диаметром 40мм, шириной 1016мм и длиной плеч 500мм. Рекомендуемый материал стабилизаторов - сталь 35ХМ, с термообработкой М50.

В дальнейшем будет разработана конструкторская документация и проведены уточняющие расчеты с учетом особенностей реальной конструкции.

Исследования выполнены ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е.Алексеева» по договору № 01-17560/2021 от 8 апреля 2022 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного производства городских электрических грузовых автомобилей с отечественной компонентной базой основных узлов и интеллектуальной системой помощи водителю». Соглашение №075-11-2022-017 от 07.04.2022г. (ИГК №000000S407522QO50002)

Библиографический список

1. Организация транспортных процессов в АПК: краткий курс лекций / С.А.Макаров // ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2014. – 50 с.
- 2.. Кравец, В. Н. Теория автомобиля / В. Н. Кравец. – Нижний Новгород : Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
3. Харитончик С.В., Выгонный А.Г., Колесникович А.Н., Матушкина О.В. Расчетно-экспериментальная оценка статической поперечной устойчивости грузовых

автомобилей с различными стабилизаторами / Актуальные вопросы машиноведения, выпуск 2, 2013, с. 158-160.

4. Бутин Д.А., Костин С.Ю., Васильев А.А., Серeda П.В. Исследования устойчивости легкого коммерческого автомобиля в зависимости от жесткости несущей системы. Фундаментальные исследования № 1, 2017. с. 21 – 25

5. ГОСТ 31507-2012 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.

References

1. Organizacija transportnyh processov v APK: kratkij kurs lekcij / S.A.Makarov // FGBOU VPO «Saratovskij GAU». – Saratov, 2014. – 50 s.

2.. Kravec, V. N. Teorija avtomobilja / V. N. Kravec. – Nizhnij Novgorod : Izd-vo NGTU im. R.E. Alekseeva, 2013. – 413 s.

3. Haritonchik S.V., Vygonnyj A.G., Kolesnikovich A.N., Matushkina O.V. Raschetno jeksperimental'naja ocenka staticheskoj poperečnoj ustojchivosti gruzovyh avtomobilej s razlichnymi stabilizatorami / Aktual'nye voprosy mashinovedenija, vypusk 2, 2013, s. 158-160.

4. Butin D.A., Kostin S.Ju., Vasil'ev A.A., Sereda P.V. Issledovanija ustojchivosti legkogo kommercheskogo avtomobilja v zavisimosti ot zhestkosti nesushhej sistemy. Fundamental'nye issledovanija № 1, 2017. s. 21 – 25

5. GOST 31507-2012 Avtotransportnye sredstva. Upravljaemost' i ustojchivost'. Tehnicheskie trebovanija. Metody ispytanij.