электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Разработка вездеходных транспортных средств с шарнирно сочлененной несущей системой на базе серийного грузового автомобиля

 # 12, декабрь 2016

Карташов А. Б.[1], Газизуллин Р. Л.[1,*]

УДК: 629.113

[1]Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
*rlgazizullin@gmail.com

Введение

Применение колесных машин для решения широкого круга транспортных задач приводит к существенно различным по конструкции и функциональности интерпретациям их систем, агрегатов и узлов в зависимости от условий, в которых автомобиль планируется эксплуатировать. Например, можно выделить несколько основных способов осуществления поворота (реализации рулевого управления) колесной машины в заданных условия.

Поворот управляемых колес (традиционна схема) – поворот колесной машины происходит путем изменения направления вектора продольной реакции в пятне контакта шины с опорной поверхностью, за счет поворота колес вокруг вертикальных осей (шкворней). Этот способ является наиболее распространенным, т. к. в сравнении с другими он энергоэффективнее и позволяет обеспечить лучшую устойчивость и управляемость транспортного средства на больших скоростях. Недостаток данного способа – более сложная конструкция колесно-ступичного узла и сокращение полезного пространства в общей компоновке автомобиля за счет выделения дополнительного объема в колесных арках, позволяющего повернуть колеса вокруг шкворней на заданный угол.

Бортовой способ поворота (танковый). При этом способе поворота колеса не могут вращаться вокруг вертикальных осей. Поворот автомобиля происходит за счет разницы подводимых крутящих моментов к колесам левого и правого бортов. Основное преимущество этого способа – меньший в сравнении с другими способами радиус поворота, недостаток – низкая энергоэффективность и больший износ шин в результате высокого скольжения в пятне контакта.

С помощью складывания секций шарнирно-сочлененной рамы. Колеса в этом случае, как и в предыдущем, не поворачиваются вокруг шкворней. Автомобиль можно условно разделить на две секции: переднюю и заднюю. При этом в несущую систему транспортного средства встроен шарнир, который позволяет вращаться передней секции относительно задней (рис. 1, а) и таким образом осуществлять изменение направления движения автомобиля.

* * *

Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки, однако часто конструктор вынужден принимать компромиссное решение и сознательно ухудшать отдельные качества автомобиля с целью получения наиболее целесообразного для конкретного назначения комплекса эксплуатационных свойств. Этот выбор жестко продиктован условиями, в которых преимущества того или иного способа являются определяющими.

Рассмотрим более подробно поворот с помощью складывания секций и причины, из-за которых этот способ получил достаточно широкое распространение. В первую очередь, шарнир в несущий системе – это дополнительные степени свободы. В зависимости от конструкции различают одностепенные шарниры – позволяют относительное вращение секций вокруг вертикальной оси складывания в горизонтальной плоскости (рис. 1, а), двухстепенные – помимо описанного выше позволяют взаимное вращение секций относительно продольной оси автомобиля (рис. 1, б) и трехстепенные шарниры – по сравнению с двухстепенным позволяют взаимное вращение секций в продольной плоскости транспортного средства (рис. 1, в).



а)



б)



в)

Рис. 1. Поворот колесных машин складыванием секций:
а) экспериментальный автомобиль НАМИ 0127;
б) шарнирно-сочлененный самосвал Volvo;
в) вездеход Лось

Если кроме взаимного смещения звеньев в горизонтальной плоскости обеспечивается их поворот в вертикальной плоскости и вокруг продольной оси (применен трехстепенной шарнир), то улучшается проходимость автомобиля, разгружаются несущая система и подвеска колес при движении по пересеченной местности. Введение этих степеней свободы приводит к уменьшению вероятности вывешивания колес при движении по пересеченной местности, т. е. к почти непрерывному контакту колес с опорной поверхностью вне зависимости от ее формы. Это в значительной мере повышает профильную проходимость транспортного средства (ТС).

Одним из способов увеличения одновременно грузоподъемности и профильной проходимости колесных машин является применение шин большого диаметра. Это решение связано с рядом проблем. Например, при замене на автомобиле с традиционной схемой поворота штатных шин на крупногабаритные, для обеспечения требуемого угла поворота колес потребуется увеличение пространства колесных арок, в противном случае при повороте шины будут пересекаться с элементами других систем, что влечет за собой изменение конструкции поворотного моста автомобиля и уменьшение максимального угла поворота колеса. Решив эту проблему можно столкнуться со следующей – обеспечение габаритной ширины автомобиля при полном повороте колес в рамках установленного предела. Максимальная ширина всех транспортных средств, эксплуатируемых на дорогах общего пользования, должна быть не более 2550 мм согласно ISO 612:1978.

Сочлененные транспортные средства широко применяются в шахтах и карьерах, т. к., обладая большой грузоподъемностью, они так же имеют меньшие габариты и большую маневренность. Угол складывания секций (полурам) в одной плоскости у таких транспортных средств может доходить до 60 градусов, что крайне актуально в условиях ограниченного пространства.

Шарнирно-сочлененной является значительная часть строительной и карьерной техники. Использование именно таких машин позволяет отказаться от прокладки подъездных путей в период строительства карьера и на начальной стадии его эксплуатации. Помимо решения задач на территории объекта, а именно перевозки грузов в условиях отсутствия дорог, для повышения экономической эффективности транспортные средства должны иметь возможность добираться до места эксплуатации своим ходом, т. е. без привлечения дополнительных транспортных средств, осуществляющих перевозку, и разрешений служб, обеспечивающих безопасность дорожного движения. Также часто встречается ситуация, когда такое транспортное средство должно двигаться не только в месте проведения строительных работ, но и доставлять или принимать груз, выезжая на дороги общего пользования. Таким образом, необходимо обеспечить ширину транспортного средства в установленных пределах и, выезжая на дороги, как можно большую скорость движения.

Другая область применения шарнирно-сочлененных транспортных средств – колесные вездеходы. При освоении Арктических зон РФ, районов Крайнего Севера и Дальнего Востока остро стоит проблема перевозки грузов в условиях неразвитой дорожной сети или ее отсутствия. В таких зонах практически невозможно построить дорогу из-за колеба-

ний погодных условий: зимой выпадает большое количество снега (до 2 м), на нем образовывается корка и передвижение транспортных средств происходит по так называемому зимнику, автомобильной дороги, эксплуатация которой возможна только в зимних условиях, при минусовой температуре, а в периоды оттепелей снег тает, образуя практически непроходимые участки со слабой несущей способностью опорной поверхности. Транспортные средства, используемые для передвижения в таких условиях, называют вездеходными транспортными средствами (ВТС) или вездеходами. Они должны обладать не только высокими показателями проходимости, но и грузоподъемности, чтобы их эксплуатация была рентабельной. Это могут быть как строительные работы, так и разработка месторождений полезных ископаемых, доставка персонала в места разработки, транспортировка крупногабаритных грузов. Одной из важных особенностей эксплуатации таким машин является то, что они двигаются по бездорожью только часть маршрута, а другую часть, часто даже более продолжительную, преодолевают по дорогам общего пользования. Например, чтобы пройти 50 км по зимнику, автомобилю необходимо преодолеть несколько тысяч километров по дорогам общего пользования. Преимущество поворота складыванием секций для ВТС – возможность сохранения ширины автомобиля в пределах дорожного габарита при использовании крупногабаритных шин. Отсюда следует, что автомобиль можно эксплуатировать на дорогах общего пользования без дополнительных разрешений. Это значительно повышает конкурентоспособность и рентабельность транспортного средства.

Из вышеперечисленного становится очевидна актуальность развития производства шарнирно сочлененных ВТС. Необходимым требованием в условиях рыночной экономики является рентабельность. Она обеспечивается крупносерийным выпуском техники. Однако спрос, который существует на автомобили, решающие подобные задачи, хоть и стабильный, но недостаточный. Выходом из сложившейся ситуации может служить унификация большинства узлов и агрегатов шарнирно-сочлененного транспортного средства с автомобилем, выпускаемым серийно, т. е. разработка новой колесной машины на базе уже существующей и широко распространенной. В добавок унификация основных частей с другими колесными машинами, применяемыми в автопарке, значительно сократит номенклатуру запасных частей и уменьшит затраты на обучение персонала и обслуживание.

Осложняет эту задачу то, что значительно сокращается пространство проектирования и, соответственно, область допустимых конструкторских решений. Возникает необходимость адаптировать к применению на шарнирно-сочлененном ВТС узлы и агрегаты серийного автомобиля, которые могут быть для этих целей не предназначены. Одной из наиболее сложных для адаптации систем является несущая система. Она должна иметь достаточную прочность и жесткость при малой массе, быть технологичной и удовлетворять компоновочным требованиям, удобство размещения на ней узлов и агрегатов.

Рассмотрим пример процесса разработки ВТС с шарнирно сочлененной рамой на базе серийного грузового автомобиля. За базовый автомобиль примем КАМАЗ 6522 с колесной формулой 6х6 и полной массой 33,1 тонны. Разрабатываемое ВТС будет имеет колесную формулу 6х6 и полную массу 30 тонн с нагрузкой на ось 10 тонн.

Выбор схемы узла сочленения. Рассмотрим типовые схемы узлов сочленения (рис. 2), предложенные специалистами Ухтинского государственного университета и рассмотренные в статье «Модель нового механизма поворота модульной сочлененной лесотранспортной машины, теоретическое и практическое обоснование конструкции» [3]. Авторы установили, что наиболее энергоэффективной является «новая» схема, применяемая на скреперах (рис. 3).

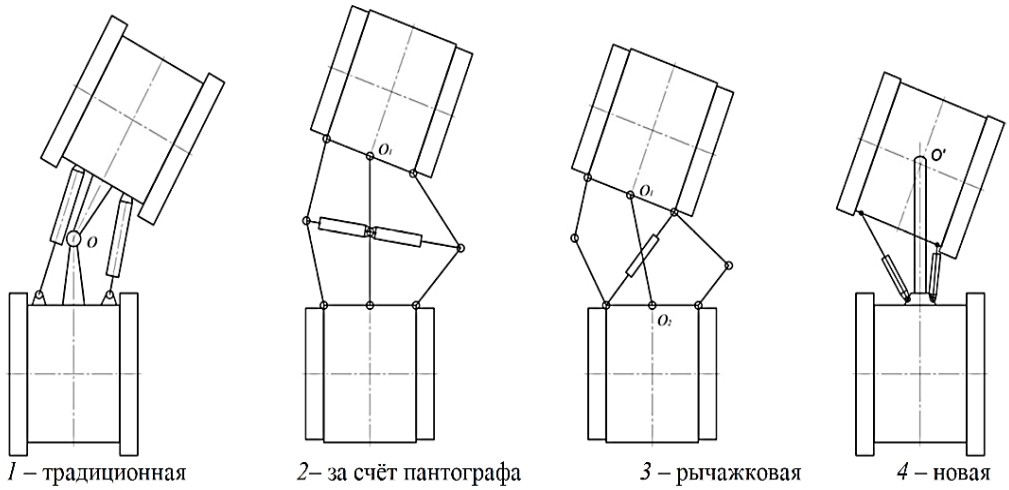


Рис. 2. Типовые схемы узлов сочленения

Эта схема является наиболее сложной для адаптации на серийно выпускаемом грузовом автомобиле, поэтому для разрабатываемого ВТС она не рассматривалась. С точки зрения компоновки в рамной несущей системе автомобиля КАМАЗ 6522 и достаточной энергоэффективности наиболее рациональным является применение схемы 1 – традиционной.

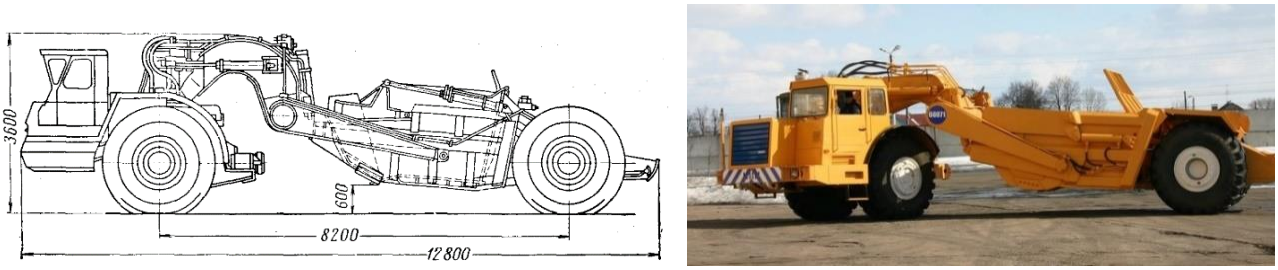


Рис. 3. Скрепер

Несмотря на то, что применение трехстепенного шарнира разгружает несущую систему и увеличивает профильную проходимость ВТС, разрабатываемый узел сочленения имеет одну степень свободы, т. к. введение двух дополнительных степеней свободы значительно усложняет конструкцию узла сочленения и нецелесообразно при применении достаточно податливой на кручение лонжеронной рамы серийного автомобиля КАМАЗ. Конечно, предпочтительно было бы разработать для ВТС новую несущую систему, интегрировав в нее несущую часть узла складывания таким образом, чтобы избежать применения резьбовых и заклепочных соединений. На рисунке 4 приведен пример несущей система задней части узла складывания, где он является «продолжением» рамы автомобиля.



Рис. 4. ВТС Foremost Commander C

Однако необходимое условие унификации с серийным автомобилем обязывает применять элементы рамы КАМАЗ для задней и передней секций, поэтому несущая система узла сочленения будет представлять навесные каркасы, которые соединяются с рамами болтами. Тогда пространство проектирования (рис. 5) ограничивается габаритами автомобиля по ширине, колесами по длине и агрегатами, устанавливаемыми в каркасы: раздаточной коробкой, промежуточной опорой, лонжеронами рамы и гидроцилиндрами, обеспечивающими складывание секций.

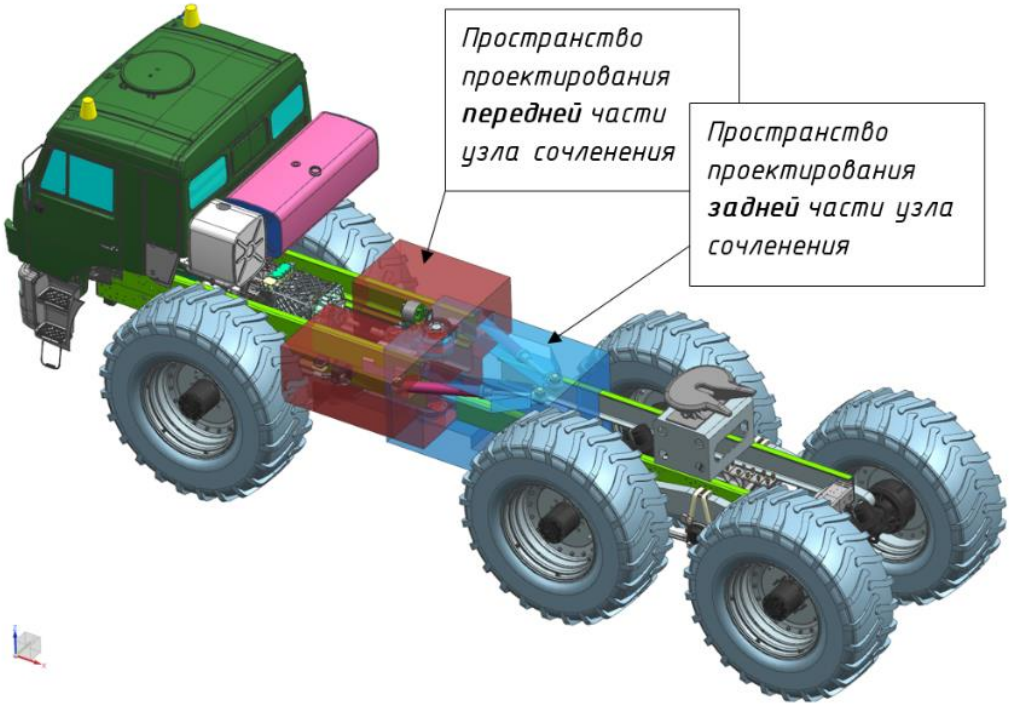
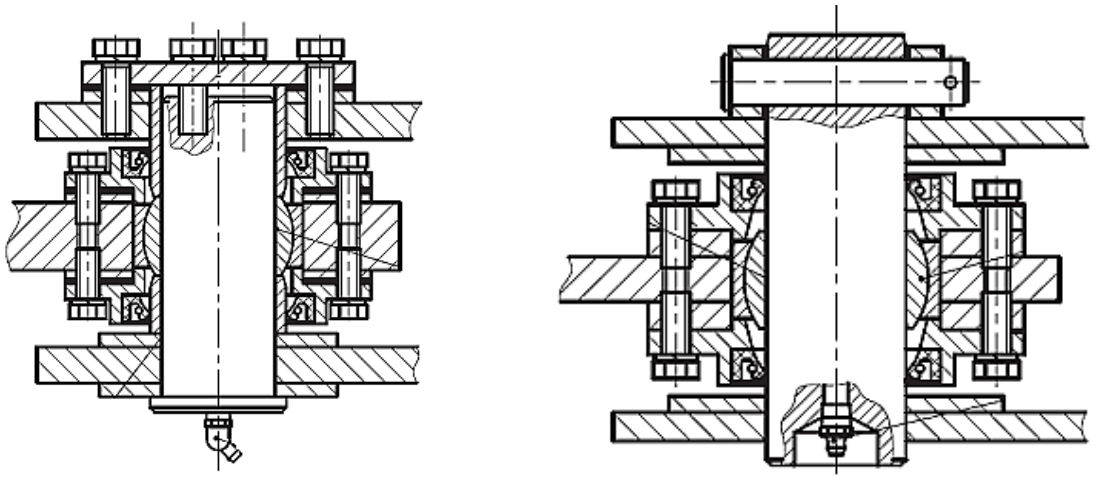


Рис. 5. Пространство проектирования

Выбор характерных точек узла сочленения. В рассматриваемой задаче характерные точки – точки шарниров оси складывания и точки крепления гидроцилиндров к раме. Целесообразно применять такую конструкция шарниров оси складывания, что осевую (вертикальную) нагрузку воспринимает только один шарнир. В противном случае система будет статически неопределима. На рисунке 6 представлена конструкция шарниров оси складывания автомобиля АМКОДОР 320СЕ. За счет упорных втулок верхний шарнир воспринимает не только радиальную, но и осевую нагрузка. Нижний шарнир имеет осевую степень свободы и воспринимает только радиальную нагрузку.



а) **б)**

Рис. 6. Конструкция: а) верхнего и б) нижнего шарнира оси складывания автомобиля АМКОДОР 320СЕ

Положение гидроцилиндров во многом определяет их типоразмер и зависит от момента сопротивления складыванию двух полурам при повороте ВТС (момента сопротивления повороту):

$$M_c = M_{\text{п}} + M_{\text{л}} \quad (1)$$

$$M_c = F_{\text{п}} l_{\text{п}} + F_{\text{л}} l_{\text{л}}, \quad (2)$$

где M_c – момент сопротивления повороту, приведенный к оси складывания, $F_{\text{п}}$ и $l_{\text{п}}$ – усилие, развиваемое правым гидроцилиндром и его плечо относительно оси складывания соответственно, аналогично $F_{\text{л}}$ и $l_{\text{л}}$.

Из (1) следует очевидный вывод: при увеличении плеч гидроцилиндров уменьшается требуемое развиваемое ими усилие при неизменном моменте сопротивления повороту или, преобразуя (1), уменьшается требуемая площадь поршня при неизменном значении номинального давления в гидросистеме.

$$M_c = pS_{\text{нп}} l_{\text{п}} + pS_{\text{пп}} l_{\text{л}}, \quad (3)$$

где p – номинальное давление в гидросистеме, $S_{\text{нп}}$ – площадь поршня в штоковой части, $S_{\text{пп}}$ – площадь поршня.

Для минимизации возникающих при повороте ВТС нагрузок в элементах узла сочленения, гидроцилиндры необходимо расположить так, чтобы плечо силы их действия относительно оси складывания было как можно большим.

Еще одним критерием «правильного» расположения гидроцилиндров является равенство объёмов рабочей жидкости, которые необходимо «прокачать» через систему для входа в поворот и выхода из него. Для этого при прямолинейном движении ВТС поршни гидроцилиндров должны быть расположены посередине рабочего объема цилиндра. Такого эффекта можно добиться, расположив один из шарниров гидроцилиндра вблизи оси скалывания.

Необходимо отметить, что нецелесообразно располагать цилиндры вне рамы ВТС, т. к. это уменьшает полезное пространство, тогда как расположение цилиндров в внутри рамы позволяет обеспечить одновременную работу обоих цилиндров при больших углах складывания за счет сохранения достаточных величин плеч действия сил со стороны штоков гидроцилиндров.

Установлено, что расположение передних либо задних шарниров гидроцилиндров вблизи оси складывания значительно сокращает требуемый рабочий ход штока при повороте на большой угол и позволяет сблизить противоположные шарниров гидроцилиндров. Кроме того, расположение гидроцилиндров практически не влияет на объем рабочей жидкости, необходимый для совершения поворота ВТС.

Расположение гидроцилиндров на разрабатываемом ВТС представлено на рисунке 7.

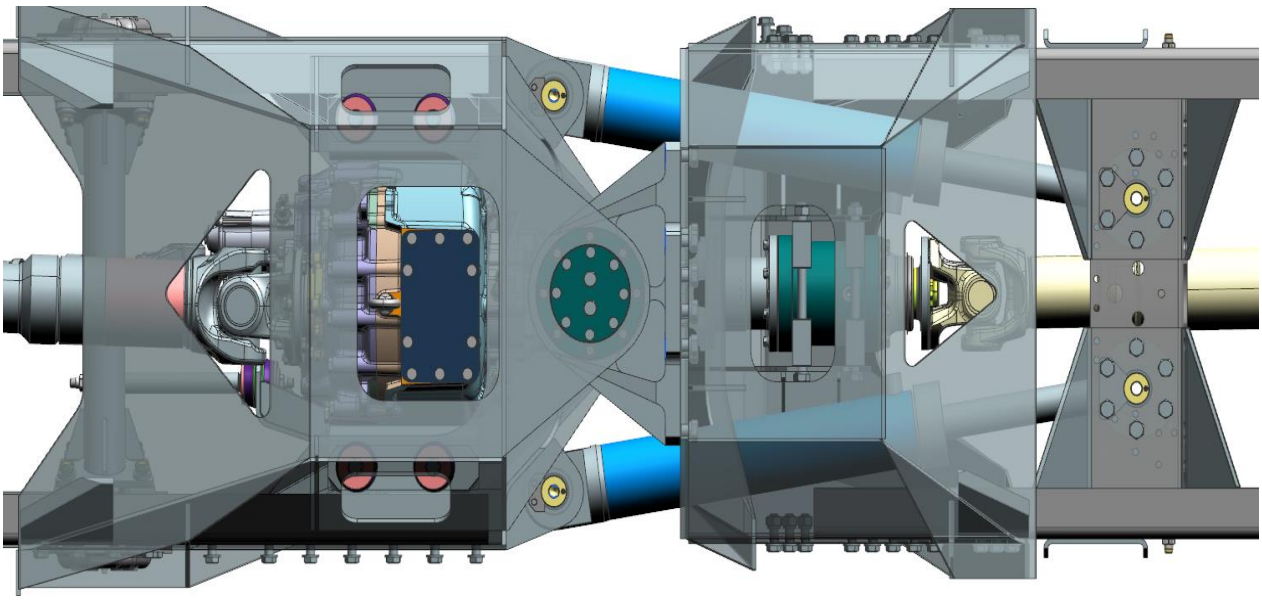


Рис. 7. Компоновка гидроцилиндров

Такая компоновка удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям и вдобавок имеет следующие преимущества: задний каркас не нагружается усилиями от гидроцилиндров, штоки гидроцилиндров защищены от грязи и механических повреждений каркасом, в качестве заднего упора используется стандартная поперечина рамы КАМАЗ.

На рисунке 8 представлены изменения величин плеч гидроцилиндров при повороте на угол 45 градусов.

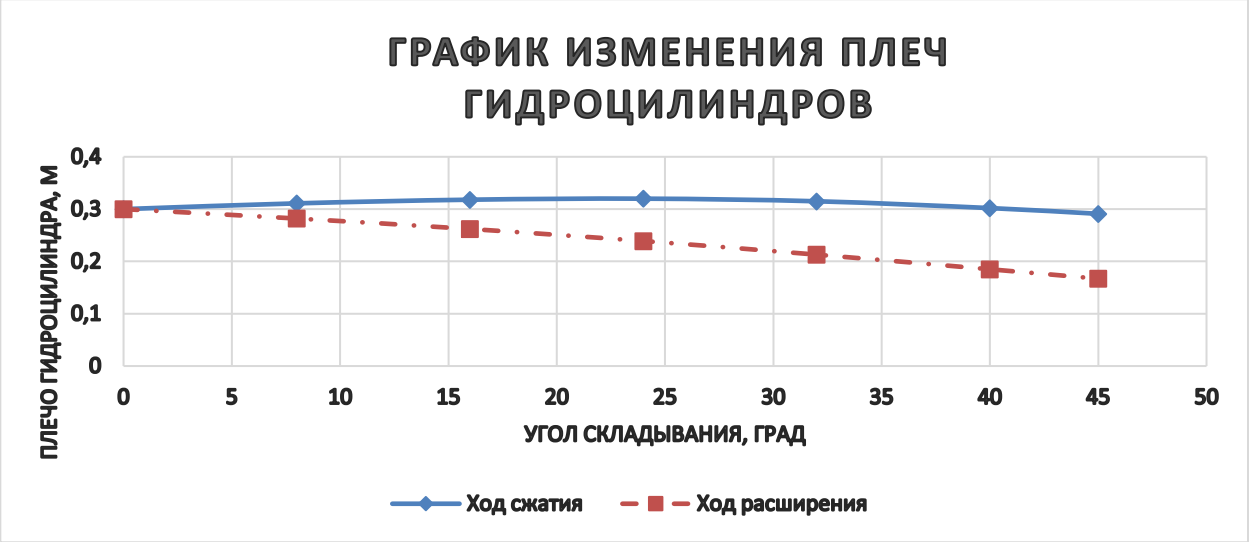
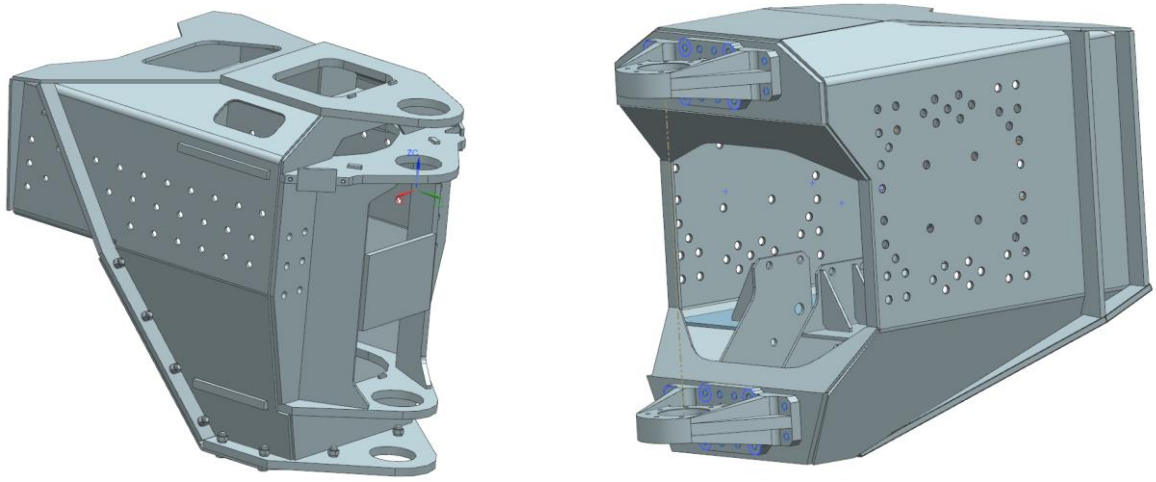


Рис. 8. Изменение плеч гидроцилиндров

Несущая система узла сочленения. Для выявления усилий, действующих в точках шарниров оси складывания и точках крепления гидроцилиндров, была рассмотрена группа наиболее тяжелых нагрузочных режимов: складывание на сухом асфальте и различные комбинации вывешивания осей при движении по ровной опорной поверхности, на спуск и на подъем. Наиболее опасными оказались следующие режимы: диагональное вывешивание на спуске (уклон 30 градусов), вывешивание третей оси при движении на подъем (уклон 30 градусов) и поворот на сухом асфальте. Для выявления наиболее нагруженных областей конструкции каркасов узла складывания на основании наиболее опасных нагрузочных режимов была проведена топологическая оптимизация по критерию минимума объема. В результате анализа конструкции, полученной при проведении топологической оптимизации, была разработана конструкция несущей системы узла складывания, представленная на рисунках 9, а и 9, б.



а) **б)**

Рис. 9. Конструкция: а) переднего и б) заднего каркасов узла складывания

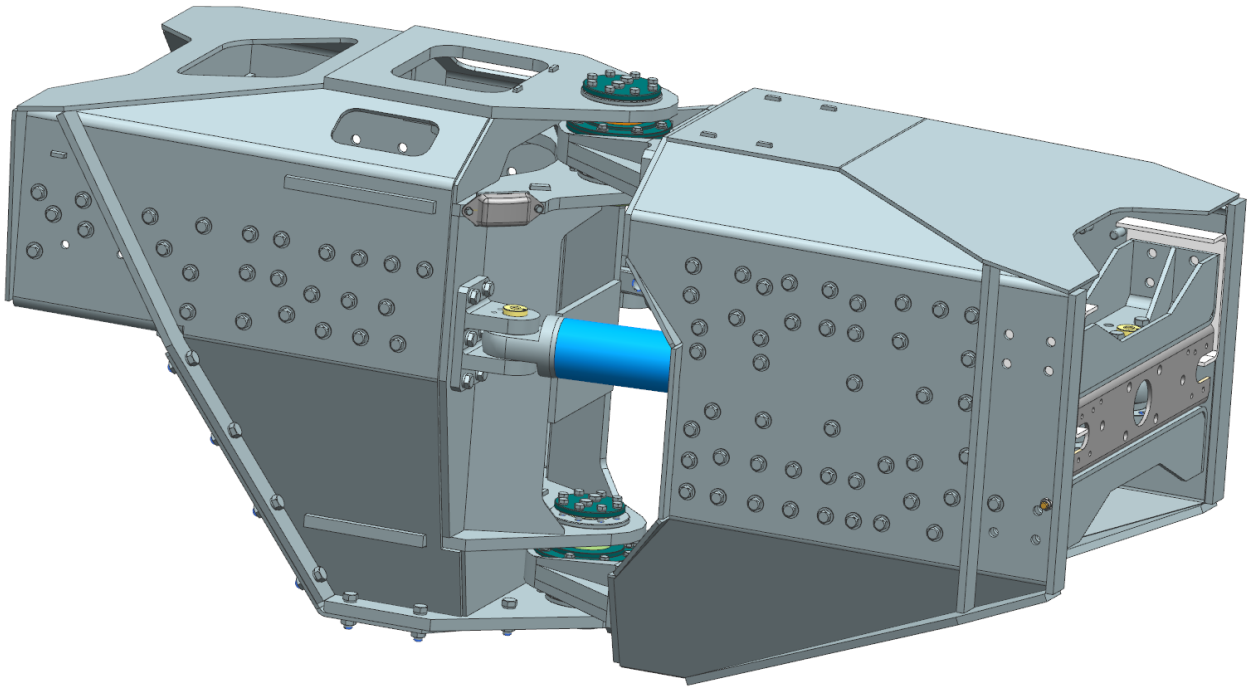


Рис. 10. Разработанный узел складывания в сборе

На рисунке 11 показан узел сочленения при складывании на угол 45 градусов.

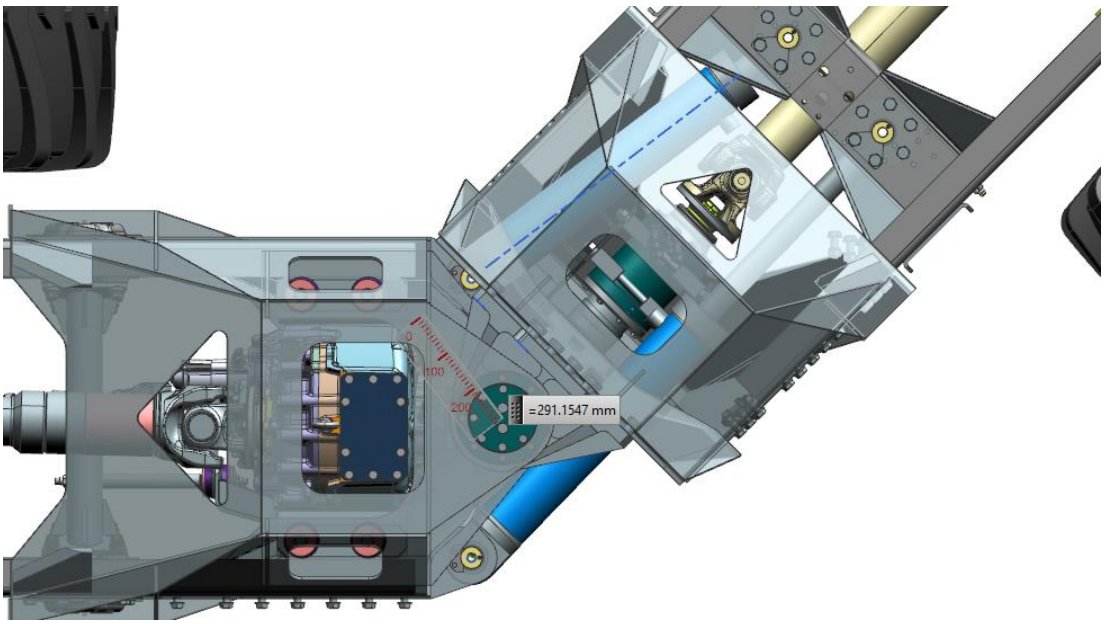


Рис. 11. Складывание на угол 45 градусов

Малый объем выпуска (около 50 автомобилей в год) накладывает ограничения на технологию изготовления каркасов, поэтому как наиболее технологичный был принят вариант изготовление каркасов из листового металла. Соединение листов осуществляется посредством сварки.

Проверочные расчеты подтвердили работоспособность конструкции (рис. 12). Максимальные напряжения не превышают 320 Мпа, предел текучести выбранного материала сталь 10ХСНД 390 МПа. Максимальные перемещения не превышают 30 мм.

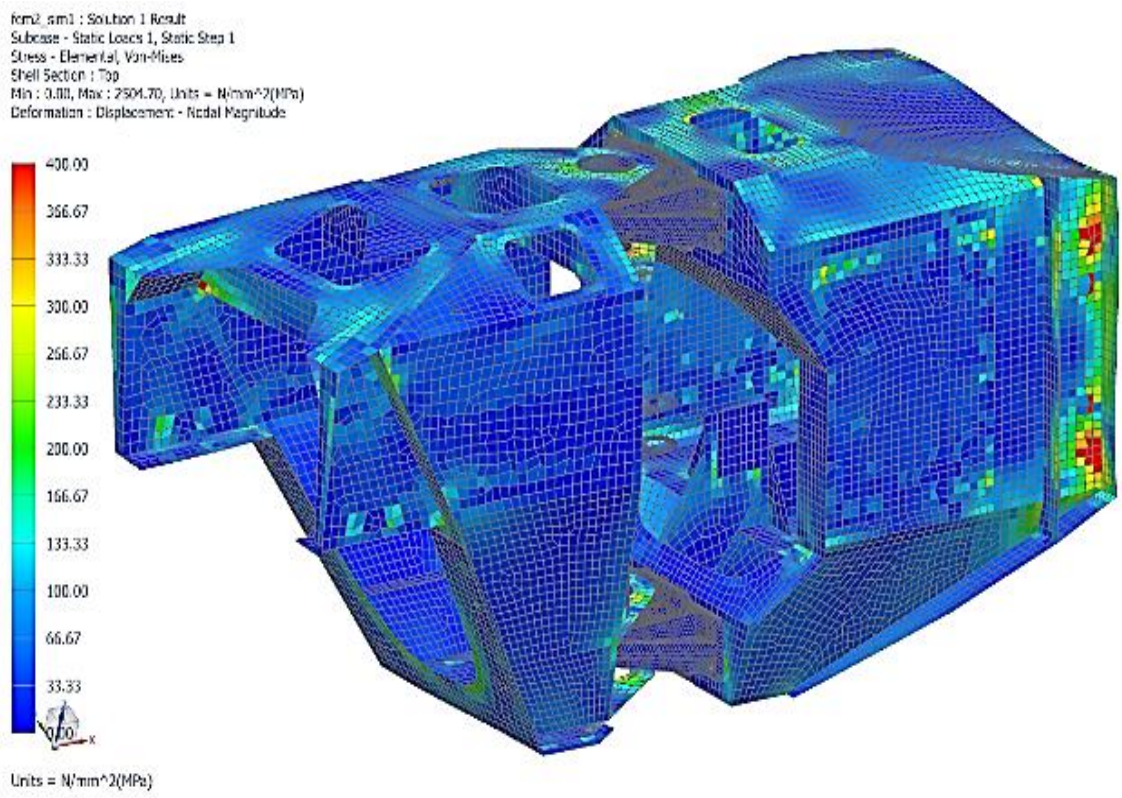


Рис. 12. Результаты проверочного расчета

Общий вид разрабатываемого ВТС на шинах низкого давления с шарнирно-сочлененной рамой на базе серийного автомобиля КАМАЗ 6522 представлен на рисунке 13.

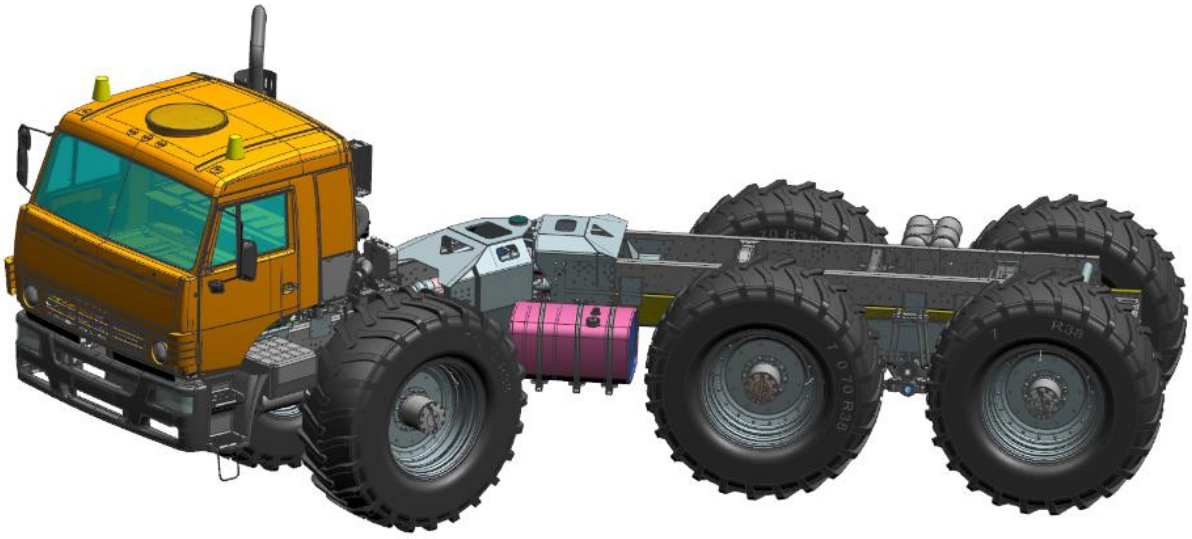


Рис. 13. ВТС на шинах низкого давления с шарнирно-сочлененной рамой на базе серийного автомобиля КАМАЗ 6522

Заключение

В ходе проделанной работы были рассмотрены ключевые особенность разработки узла сочленения для ВТС на крупногабаритных шинах сверхнизкого давления, изготовленного на база серийно выпускаемого грузового автомобиля. Определена наиболее рациональная для данного автомобиля схема узла складывания, проработана компоновка узла складывания, определены точки шарниров оси складывания и точки крепления гидроцилиндров поворота, разработана несущая система узла складывания и проведены расчеты на прочность, подтверждающие ее работоспособность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №11-38-07/15 от 29.07.2015 г. между ПАО «КАМАЗ» и «Московским государственным машиностроительным университетом (МАМИ)»

Список литературы

[1]. Проектирование полноприводных колесных машин. Учебник для вузов: П79 В 3 т. Т.2. / Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Гладов Г.И., Жеглов Л. Ф., Зузов В. Н. и др.; Под ред. А.А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 527 с.

[2]. Ларин В. В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / В.В. Ларин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2010. 391с.

[3]. Волосунов М.В., Шоль Н.Р., Будевич Е.А. Модель нового механизма поворота модульной сочлененной лесотранспортной машины, теоретическое и практическое обоснование конструкции // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. №1. С 57-62.

[4]. Шнейдер В.А. Скреперы, бульдозеры, грейдеры. 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во "Высшая школа". 1968. 264 с.