

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные
процессы»

(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

На тему: «Совершенствование методов проектирования конструкций бензобаков
легковых автомобилей в САПР»

Обучающийся:

А.В. Агапов

(И.О. Фамилия)

(Подпись)

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент Е.Н. Почекуев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Содержание

Введение.....	4
1 Обзор конструкции топливных баков и программного обеспечения.....	7
1.1 Тенденции развития конструкции топливных баков	7
1.2 Описание видов и функционального назначения внутренних элементов конструкции топливных баков	9
1.3 Анализ материалов для изготовления топливных баков.....	12
1.4 Обзор программного обеспечения (CAD/CAE) для разработки электронной модели топливного бака	15
2 Разработка в САПР электронной модели топливного бака.....	21
2.1 Построение в САПР электронных моделей компонентов топливного бака	21
2.2 Построение в САПР электронной модели сборки топливного бака ...	34
2.3 Совершенствование электронной модели топливного бака в САПР ..	40
3 Инженерный анализ характеристик топливного бака в САПР	50
3.1 Описание метода конечных элементов.....	50
3.2 Подготовка геометрии электронной модели для проведения инженерного анализа	52
3.3 Построение сетки конечных элементов электронной модели бака.....	56
3.4 Моделирование материала для конечно-элементной модели.....	60
3.5 Создание расчетной модели для симуляции избыточного давления в баке	63
3.6 Создание расчетной модели для симуляции гидравлического испытания бака.....	70

3.7	Создание расчетной модели для симуляции испытания на провисание бака	73
3.8	Создание расчетной модели для симуляции испытания на стойкость бака к воздействию температур.....	75
3.9	Создание расчетной модели для симуляции испытания на ударопрочность бака (при свободном падении).....	78
3.10	Отображение и просмотр результатов в окне постпроцессора.....	80
3.11	Анализ результатов тестов инженерного моделирования топливного бака	84
4	Методика совершенствования конструкции корпуса топливного бака в САПР	96
4.1	Описание методики проектирования конструкции топливных баков легковых автомобилей в САПР	96
4.2	Направление совершенствования конструкции топливных баков....	100
	Заключение	103
	Список используемой литературы и используемых источников.....	105

Введение

Актуальность работы. Корпуса современных пластиковых топливных баков состоят из четырех видов материалов, распределенных по шести слоям. Производство специально разработанных материалов для топливных баков осуществляется крупнейшими международными производителями химической продукции и полимерных материалов.

Основная стоимость материалов топливного бака приходится на полиэтилен высокой плотности (HDPE), ввиду наибольшего содержания его в структуре топливного бака. Снижение расхода этого материала является одной из ключевых задач и имеет следующие плюсы:

- Повышение прибыли компаний-производителей топливных баков за счёт снижения расходов на материалы, уменьшения стоимости сырья, транспортных расходов и затрат на производство самого материала;
- Повышение экологической безопасности. Производство HDPE требует нефти или природного газа в качестве основного сырья. Добыча нефти и газа может приводить к различным негативным последствиям для окружающей среды, включая загрязнение почвы и воды, разрушение экосистем и выбросы парниковых газов. Кроме того, в процессе производства HDPE могут выделяться различные химические вещества и загрязнители в атмосферу;
- Снижение потребления энергии, включая использование видов энергии, связанных с выбросами парниковых газов и другими видами загрязнений.

Сокращение использования полиэтилена высокой плотности в пластиковых топливных баках возможно в результате конструктивных изменений, например, за счёт отказа от внутренней перегородки, необходимой

для снижения шума, вызванного перемещением топлива [27], а в некоторых случаях – придания жёсткости корпусу топливного бака. Вес перегородки в топливных баках легковых автомобилей может достигать одного килограмма, а зачастую и превышать данное значение. Отказ от наличия в конструкции корпуса топливного бака данной перегородки, без ухудшения свойств топливного бака, внесет существенный вклад не только в экономическую составляющую конкретного предприятия, но в улучшение экологической обстановки в целом за счет общего снижения потребления полиэтилена. Однако подобные существенные конструктивные изменения должны производиться на основе моделирования и инженерного анализа конструкции топливного бака в САПР.

Цель работы. Создание методики совершенствования конструкции корпусов топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку, для экономии сырья и снижения себестоимости производства пластиковых топливных баков при сохранении их эксплуатационных характеристик в САПР.

Задачи работы:

- Обзор источников по теме испытаний топливных баков, а также применения и функционального назначения внутренних перегородок;
- Создание в САПР трёхмерной модели исходной конструкции корпуса топливного бака, имеющей в составе внутреннюю перегородку;
- Предварительное совершенствование в САПР созданной конструкции топливного бака, исключение перегородки из состава конструкции;
- Определение методик моделирования механической прочности корпуса топливного бака;
- Создание конечно-элементных моделей двух вариантов корпусов топливных баков;
- Создание расчётных моделей для моделирования различных испытаний двух вариантов корпусов топливных баков;

- Проведение сравнительного инженерного анализа и оценка влияния изменения конструкции на механическую прочность корпусов топливных баков;
- Проведение повторного совершенствования конструкции топливного бака по итогам инженерного анализа, в случае неудовлетворительного результата;
- Описание алгоритма и основных этапов методики.

Научная новизна. Методика совершенствования корпусов пластиковых топливных баков на основе моделирования и инженерного анализа в САПР, для повышения его эксплуатационных характеристик, представляет собой научную новизну данной работы.

Объект исследования. Объектом исследования является методика совершенствования конструкции корпусов пластиковых топливных баков.

Предмет исследования. Предметом исследования является пластиковый топливный бак легкового автомобиля, изначально имеющий в конструкции внутреннюю перегородку.

1 Обзор конструкции топливных баков и программного обеспечения

1.1 Тенденции развития конструкции топливных баков

Конструкция топливных баков значительно изменялась с течением времени. На заре автомобилестроения топливные баки часто представляли собой простые металлические контейнеры, которые устанавливались снаружи или интегрировались в шасси. Обычно они были сделаны из стали и не имели сложных функций безопасности. По мере развития автомобильных технологий топливные баки стали размещать внутри конструкции автомобиля. Это изменение помогло защитить бак от внешних повреждений и снизить риск протечек или пожаров в случае столкновения [19].

В середине двадцатого века были представлены системы перегородок, чтобы свести к минимуму плескание топлива внутри бака. Внутренние перегородки в топливных баках – это перегородки или вставки, которые помогают контролировать движение топлива при ускорении, торможении и прохождении поворотов. Они улучшают устойчивость, снижают риски и оптимизируют управление автомобилем. В зависимости от конструкции, внутренние перегородки могут придавать прочность корпусу топливного бака.

Со временем в конструкцию топливного бака были включены решения по безопасности, чтобы снизить риск несчастных случаев и инцидентов, связанных с топливом. Данные меры включали в себя применение гравитационных клапанов, которые предотвращают утечку топлива при авариях с опрокидыванием, и использование ударопрочных материалов, чтобы противостоять столкновениям [20].

По мере роста заботы об окружающей среде конструкция топливного бака адаптировалась в соответствии с нормативными требованиями. Были

введены системы контроля выбросов в результате испарения для сокращения выбросов паров топлива в атмосферу, а также системы улавливания паров.

Акцентируя внимание на эффективности использования топлива, производители начали изучать легкие материалы для топливных баков. Традиционные стальные резервуары постепенно заменялись такими материалами, как пластик и композиты, которые обеспечивают снижение веса при сохранении долговечности и безопасности.

Современные конструкции топливных баков включают технологию с использованием датчиков для контроля уровня топлива, определения давления и обнаружения утечек. Эти датчики передают данные бортовым системам автомобиля в режиме реального времени, обеспечивая точное управление подачей топлива и раннее обнаружение потенциальных проблем.

По мере того, как альтернативные виды топлива приобретали популярность, конструкции топливных баков становились разнообразнее. К примеру, в электромобилях вместо обычных топливных баков используются аккумуляторные батареи, а в автомобилях на водородных топливных элементах требуются специальные баки для безопасного хранения и распределения газообразного водорода [1].

На протяжении всей истории конструкция топливного бака определялась такими параметрами как безопасность, эффективность использования топлива, экологические нормы и технологические достижения. В процессе разработки и серийного производства топливные баки подвергаются различным суровым испытаниям, целью которых является проверка их соответствия требованиям [6] [19] [23] [26] [28].

1.2 Описание видов и функционального назначения внутренних элементов конструкции топливных баков

Внутренние перегородки в топливных баках представляют собой преграды, которые разделяют внутреннее пространство бака на отдельные отсеки или камеры. Они выполняют несколько важных функций:

- Улучшение стабильности и управляемости транспортного средства. Они предотвращают большие перемещения топлива внутри бака, которые могут изменять центр тяжести и влиять на равновесие транспортного средства. Данная проблема преимущественно характерна для летательных аппаратов или автоцистерн, перевозящих топливо;
- Подавление газообразования. Помогают снизить газообразование в топливном баке. Они ограничивают перемешивание топлива и снижают образование пузырьков газа, что может помочь в предотвращении возникновения проблем с подачей топлива и работой двигателя;
- Снижение шумов от перемещения топлива. К современным пассажирским транспортным средствам применяются строгие требования в части допустимого уровня шума. При разгоне и замедлении транспортного средства, при резких маневрах, а также при движении по неровной дороге, топливо активно перемещается внутри бака, что создает шум, снижающий комфорт и безопасность водителя и пассажиров. Внутренние перегородки топливных баков создают отсеки или преграды, которые разделяют топливо на более маленькие объемы, что помогает снизить интенсивность плескания и, соответственно, шум [29];
- Придание жёсткости конструкции топливного бака. Как правило, при проектировании бака с погружными (погруженными в материал

корпуса бака) внутренними перегородками, в конструкцию корпуса изначально не вводятся необходимые для придания жёсткости решения, дабы не усложнять геометрию корпуса топливного бака и, соответственно, стоимость изготовления выдувной пресс-формы. Таким образом, жёсткость конструкции обеспечивается за счет внутренней перегородки, расположенной «враспор» внутри корпуса топливного бака и связывающей собой верхнюю и нижнюю части.

Примеры применения внутренних перегородок в различных отраслях приведены на рисунке 1. Примеры применения внутренних перегородок в пластиковых топливных баках – на рисунке 2.



Рисунок 1 – Примеры применения внутренних перегородок: в ракете, крыле самолета и топливной цистерне

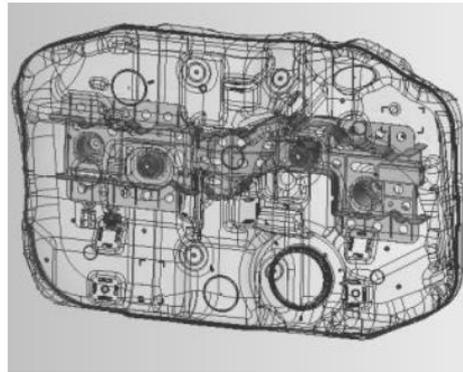
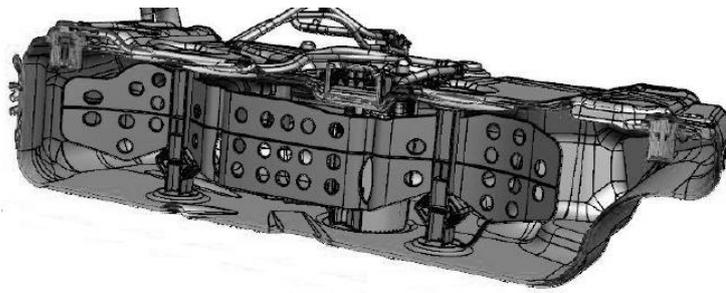


Рисунок 2 – Примеры применения внутренних перегородок в пластиковых топливных баках

Пластиковые топливные баки для легковых автомобилей производятся по технологии выдувного формования [24]. Процесс изготовления пластиковых топливных баков с внутренними перегородками состоит из следующих этапов (рисунок 3):

- Внутренняя перегородка переносится роботизированной рукой и устанавливается (позиционируется) в выдувную форму как закладная деталь;
- Материал топливного бака, представляющий собой «рукав» из размягченного пластика, опускается сверху на закладную деталь, проводится предварительный раздув;
- Форма смыкается, прижимая материал рукава к погружным площадкам внутренней перегородки, производится основной раздув пластикового «рукава», формирующий геометрию бака;
- Форма размыкается, топливный бак с закладной деталью извлекается механизированной рукой и транспортируется в зону охлаждения.

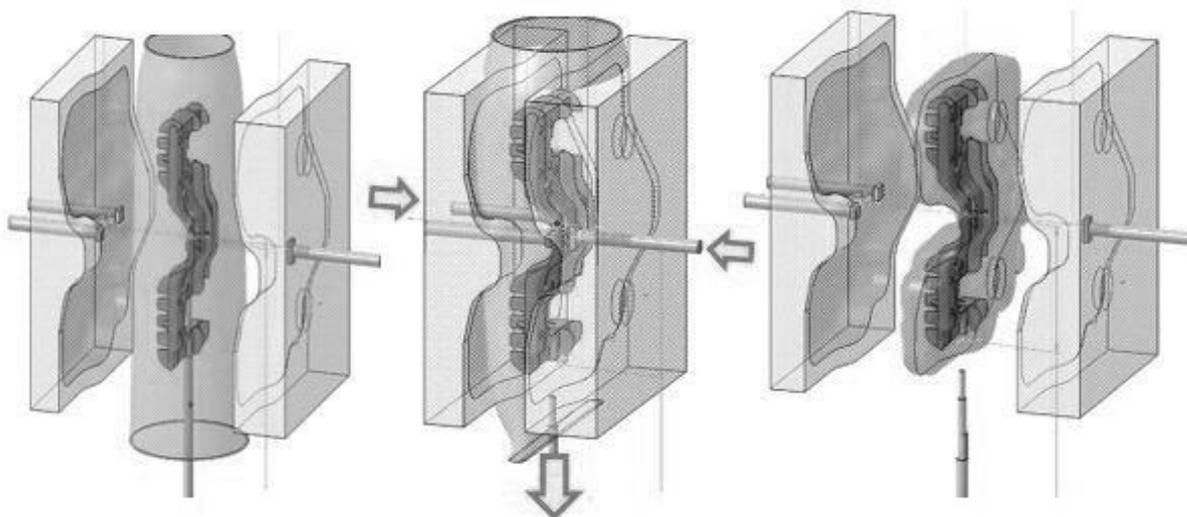


Рисунок 3 – Процесс производства пластикового топливного бака с внутренней перегородкой

1.3 Анализ материалов для изготовления топливных баков

Корпуса современных пластиковых топливных баков состоят из четырех видов материалов, распределенных по шести слоям [21]. Производство специально разработанных марок данных материалов осуществляется крупнейшими международными производителями химической продукции и полимерных материалов. Количественное содержание в структуре топливного бака каждого вида материала варьируется в зависимости от требований автопроизводителей и внутренних стандартов предприятий-поставщиков. Каждый из видов материалов выполняет свою роль:

- Основной материал (Полиэтилен высокой плотности, HDPE). Внутренний и внешний слои топливного бака изготавливаются из полиэтилена высокой плотности, с той лишь разницей, что наружный слой содержит в себе краситель, придающий топливному баку характерный черный цвет, защищающий топливный бак от

разрушительного воздействия ультрафиолетового излучения. HDPE применяется из-за его превосходной химической стойкости, низкой проницаемости и способности выдерживать воздействие топлива и других агрессивных веществ. Содержание: $\approx 30-35\%$ или более от общей толщины стенки корпуса бака для внутреннего слоя; $\approx 5-10\%$ для внешнего слоя;

- Барьерный слой (Сополимер этилена и винилового спирта, EVOH). Для предотвращения проникновения паров топлива через стенку бака часто используется барьерный слой из сополимера этилена и винилового спирта [22] [30]. EVOH обеспечивает исключительную стойкость к парам топлива и помогает сохранить целостность топливного бака. Содержание: не менее 0,01мм в общей толщине стенки корпуса бака, при необходимом условии непрерывности по всему контуру. Применение барьерного слоя из сополимера этилена и винилового спирта является более современным решением, нежели фторирование внутренней поверхности топливного бака [18];
- Адгезивный слой (Линейный полиэтилен низкой плотности, LLDPE). Между внутренним, внешним и барьерным слоями наносится адгезивный (клеевой) слой для обеспечения надлежащего сцепления и адгезии между слоями топливного бака. Содержание: не менее 0,01мм в общей толщине стенки корпуса бака;
- Слой из дробленого пластика (Regrind). Представляет собой повторно расплавленный материал, содержащий в себе каждый из вышеперечисленных материалов в пропорциональных долях. Получается дроблением отхода, образующегося в процессе выдувного формования топливных баков. Содержание: $\approx 50-55\%$ или менее от общей толщины стенки корпуса бака.

Структура шестислойного бака представлена на рисунке 4.

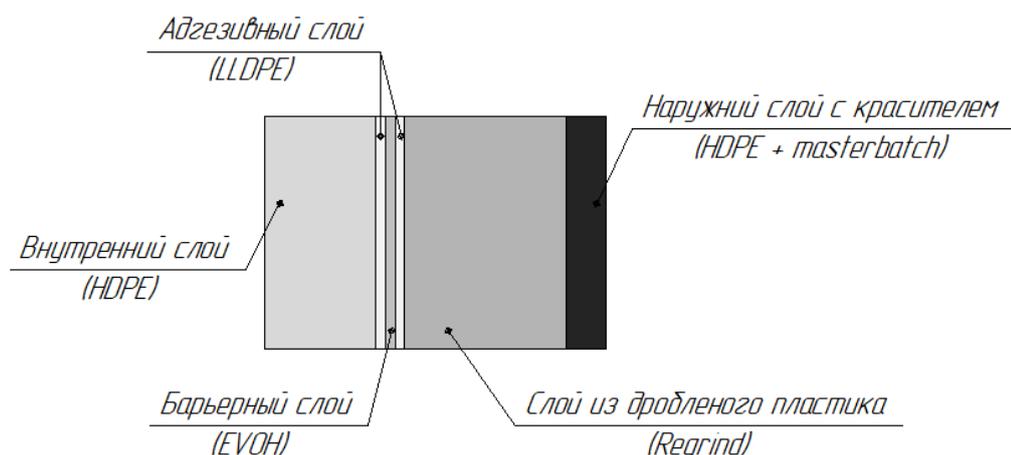


Рисунок 4 – Структура и распределение слоев шестислойного топливного бака

Конкретные марки материалов, используемые в шестислойном топливном баке, могут различаться в зависимости от выбора производителя конструкции, нормативных требований и технических характеристик. Кроме того, производители могут включать в сырье добавки, наполнители или армирующие материалы для улучшения определенных свойств топливного бака, таких как огнестойкость, стабильность размеров или ударопрочность.

Пластиковые внутренние перегородки топливных баков, как правило, изготавливаются из полиэтилена высокой плотности, что обусловлено необходимостью вплавления погружных бобышек, имеющих на площадках внутренней перегородки в тело корпуса пластикового топливного бака, внутренний слой которых, как было отмечено выше, изготавливается их аналогичного материала. Это необходимо для качественного соединения пластика, требующего единства типа материала.

1.4 Обзор программного обеспечения (CAD/CAE) для разработки электронной модели топливного бака

Siemens NX считается одной из лучших систем САПР в мире и широко используется профессионалами в различных отраслях, включая автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, машиностроение и промышленный дизайн, для проектирования, моделирования и производства сложных продуктов. Он предлагает полный набор инструментов для 3D-моделирования, проектирования сборки, симуляции и обработки, что делает его подходящим для сложных конструкторских проектов.

Причины, по которым Siemens NX считается одной из лучших САПР-систем, включают в себя:

- Расширенные функции: Siemens NX предоставляет широкий спектр расширенных функций и возможностей, включая параметрическое и прямое моделирование, поверхностный дизайн, обратное проектирование и симуляцию;
- Интеграция: Siemens NX хорошо интегрируется с другими программными решениями, такими как системы управления жизненным циклом продукции (PLM) [15] и программное обеспечение для автоматизированного производства (CAM) [2]. Подобная интеграция обеспечивает эффективный обмен данными и совместную работу на протяжении всего цикла разработки продукта;
- Междисциплинарный подход: Siemens NX поддерживает междисциплинарное проектирование и моделирование, позволяя инженерам из различных областей знаний беспрепятственно сотрудничать и интегрировать свою работу. Эта возможность особенно полезна для сложных проектов, требующих привлечения специалистов из нескольких инженерных дисциплин [10].

В данной работе для решения поставленных задач используется Siemens NX 11.0, выбор которого обусловлен тем, что это программное решение

позволит совершить все запланированные работы в рамках одной системы автоматизированного проектирования: смоделировать первоначальную и усовершенствованную модели, провести инженерный анализ их характеристик и, при необходимости, повторно осуществить совершенствование по результатам анализа, не прибегая к необходимости использования сторонних САПР и, вследствие, нейтральных форматов обмена 3D-данными.

Для начала рассмотрим основные элементы интерфейса стартового окна Siemens NX 11.0 в модуле «Моделирование» [5] (рисунок 5):

1. Заголовок окна, панель быстрых команд и навигации между окнами;
2. Панели инструментов;
3. Панель выбора, ориентации видов и закраски;
4. Панель ресурсов;
5. Команды, настроенные пользователем;
6. Окно поиска по функциям и командам;
7. Рабочая область.

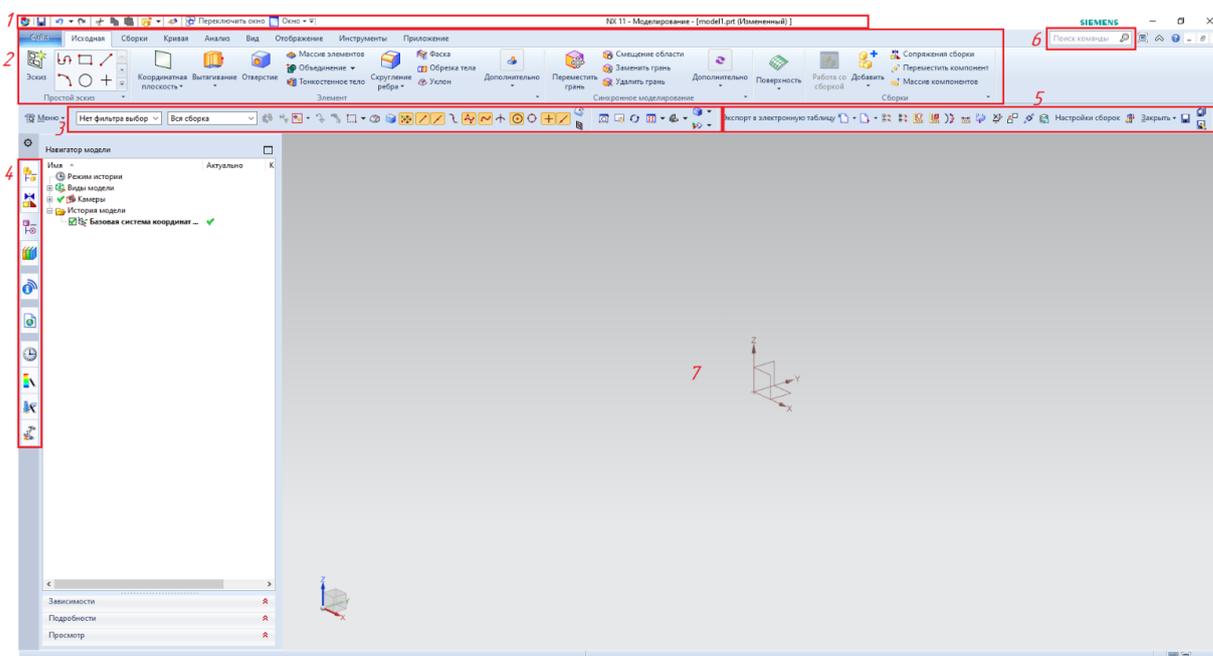


Рисунок 5 – Стартовое окно модуля «Моделирование» в Siemens NX 11.0

Основным элементом панели ресурсов при моделировании детали является вкладка «Навигатор модели» (рисунок 6). В данной вкладке полностью отображены составные элементы детали и операции, проведенные над ними. Отображение и параметры элементов «Навигатора модели» могут быть изменены при помощи функционала, доступного по правому клику мышки на конкретном элементе.

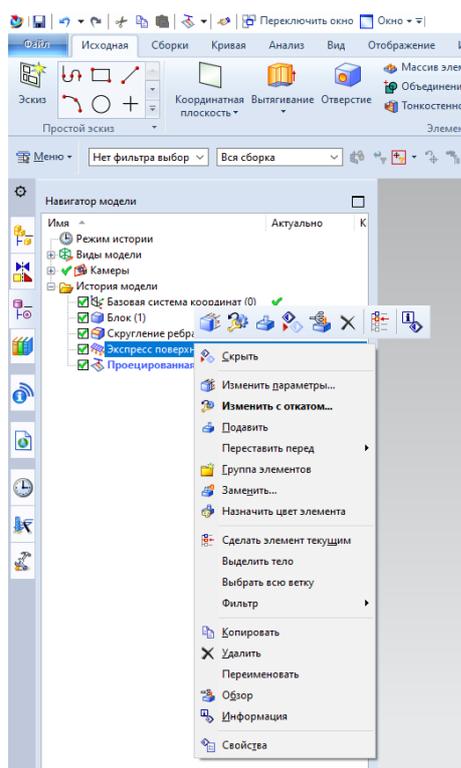


Рисунок 6 – Вкладка «Навигатор модели» в Siemens NX 11.0

Также необходимо рассмотреть основные элементы интерфейса стартового окна модуля «NX Расширенная симуляция», являющегося частью Siemens NX 11.0 (рисунок 7) [5].

Интерфейс и организация рабочего пространства очень схожи с модулем «Моделирование»:

1. Заголовок окна, панель быстрых команд и навигации между окнами;
2. Панели инструментов и окно поиска по функциям и командам;

3. Панель выбора, ориентации видов и закраски;
4. Панель ресурсов;
5. Рабочая область.

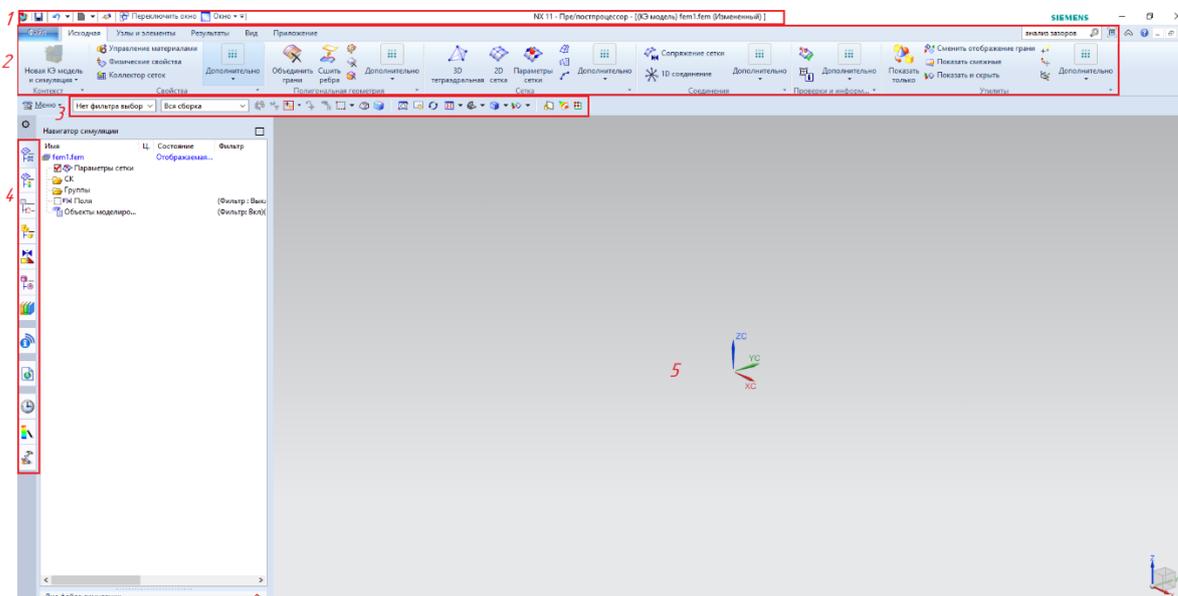


Рисунок 7 – Стартовое окно модуля «NX Расширенная симуляция» в Siemens NX 11.0

Основным решателем в модуле «NX Расширенная симуляция» является зарекомендовавший себя в течение многих лет конечно-элементный решатель Nastran. Nastran – это одна из первых вычислительных систем в мире. В 2003 году исходные коды, а также все интеллектуальные наработки по системе Nastran были приобретены компанией Siemens PLM Software. За последние годы компании Siemens PLM Software удалось существенно усовершенствовать и расширить NX Nastran.

Кроме решателя Nastran, в основу «NX Расширенная симуляция» легли и другие решения численного анализа. Это решения I-Deas Master FEM, I-Deas Laminate Composites и I-Deas Advanced Durability. Кроме того, это модули для анализа тепломассопереноса, с 1983 года разрабатываемые компанией Maya Heat Transfer Technologies, и впоследствии вошедшие в портфель решений Siemens PLM Software как NX Flow/Advanced Flow, NX Thermal/Advanced

Thermal, NX Space System Thermal, NX Electronic System Cooling. В 2011 году появилось решение NX Topology Optimization, в основу которого заложены алгоритмы Tosca, разработанные компанией FE Design. Технологии Adina легли в основу NX Nastran Advanced Nonlinear – модуля для анализа сложных статических и динамических нелинейных процессов.

Таким образом, портфель CAE-решений Siemens PLM Software объединил в себе большое количество современных, лучших в своем классе технологий, таких как технологии Nastran, Adina R&D, I-Deas CAE, Maya HTT, Tosca, Recurdyne. Из всех возможностей этих технологий компания Siemens PLM Software выделила лучшие для решения каждого класса задач, объединила их в едином решении и продолжает развивать и улучшать для анализа прикладных задач любой сложности [3].

Выводы:

- В результате анализа информации из существующих источников установлено, что конструкция топливных баков изменялась с течением лет в зависимости от общего уровня развития техники и повышающихся требований к производительности и безопасности транспортных средств в целом и топливных баков в частности;
- Выявлено, что внутренние перегородки широко применяются в конструкции топливных баков и иных ёмкостей, предназначенных для хранения и транспортировки топлива, как в автомобилестроении, так и в других отраслях. Целью применения перегородок является снижение шумов от перемещения топлива, снижение влияния перемещения топлива на управляемость транспортного средства (в первую очередь характерно для ракет и автоцистерн), а в некоторых случаях – для увеличения жёсткости конструкции корпуса топливного бака;

- Показано, что современные пластиковые топливные баки легковых автомобилей производятся по технологии выдувного формования и изготавливаются из четырёх видов материалов, распределённых по шести слоям. Внутренние перегородки корпусов пластиковых топливных баков изготавливаются из полиэтилена высокой плотности (HDPE), являющегося материалом с наибольшим содержанием при производстве корпуса топливного бака;
- Установлено, что для совершенствования конструкции корпусов топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку, целесообразно разработать методику на основе САПР Siemens NX, которая позволит отказаться от применения внутренней перегородки топливного бака при сохранении его эксплуатационных характеристик.

2 Разработка в САПР электронной модели топливного бака

2.1 Построение в САПР электронных моделей компонентов топливного бака

Корпус пластикового топливного бака – наиболее важная составляющая топливного бака в сборе. Его основное назначение заключается в том, чтобы хранить внутри себя топливо, позволяя транспортным средствам и оборудованию работать эффективно и безопасно.

Требования к корпусу топливного бака зависят от различных факторов, включая тип транспортного средства или оборудования, тип сохраняемого топлива и применимые правила или отраслевые стандарты. Однако некоторые общие требования к корпусам топливных баков включают:

- Прочность и долговечность. Корпус должен выдерживать давление и нагрузки, создаваемые топливом, а также сопротивляться ударам, вибрациям и другим внешним воздействиям. Он должен иметь достаточную прочность, чтобы предотвратить разрыв или утечку;
- Коррозионная стойкость. Топливные баки часто подвергаются воздействию влаги и других агрессивных элементов. Корпус должен быть изготовлен из материалов или покрытий, устойчивых к коррозии, чтобы обеспечить долговечность и целостность резервуара;
- Герметичность и предотвращение утечек. Корпус топливного бака должен иметь эффективные механизмы герметизации для предотвращения утечек топлива. Это включает в себя правильно спроектированные соединения, уплотнения и соединения, обеспечивающие плотную и надежную посадку;
- Вентиляция и регулирование давления. В топливных баках требуется наличие системы вентиляции для регулирования давления и предотвращения скопления паров. В корпусе должны быть

предусмотрена возможность размещения компонентов, обеспечивающих вентиляцию, для поддержания безопасного уровня давления внутри резервуара;

- Соответствие нормам. Корпуса топливных баков должны соответствовать соответствующим нормам безопасности и охраны окружающей среды, которые могут различаться в зависимости от региона применения транспортного средства;
- Ударопрочность. Корпус должен быть сконструирован таким образом, чтобы выдерживать ударные нагрузки и сводить к минимуму риск утечки или разрыва топлива в случае аварии.

Наличие такого широкого перечня требований к корпусу топливного бака наделяет процесс его разработки и проектирования особой важностью. Разработка корпуса топливного бака – первоочередной и наиболее трудоёмкий процесс, являющийся основой для дальнейшей компоновки и размещения остальных компонентов топливной системы.

Исходными данными для разработки являются:

- Тип топлива. Свойства топлива, включая его плотность, вязкость и химический состав будут влиять на конструкцию и выбор материала;
- Ёмкость топливного бака. Данные сведения, как правило, передаются со стороны заказчика разработки топливного бака или определяются исходя из требований к характеристикам транспортного средства;
- Доступное пространство и тип крепления;
- Производственные процессы;
- Условия окружающей среды.

Для непосредственно создания математической модели топливного бака в сборе, как правило, заказчиком разработки предоставляются цифровые данные, в виде трёхмерного окружения топливного бака (части кузова транспортного средства, рисунок 8) или же доступный объём, в виде

твёрдотельного элемента, в который необходимо уместить топливный бак (рисунок 9).

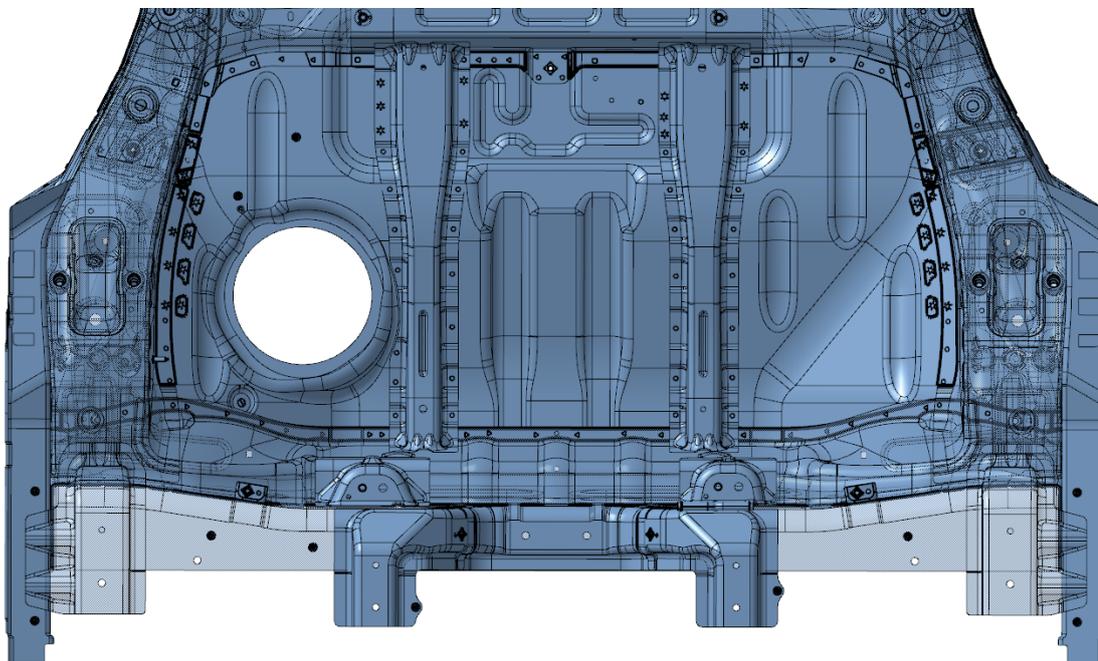


Рисунок 8 – Пример окружения топливного бака (элементы кузова)

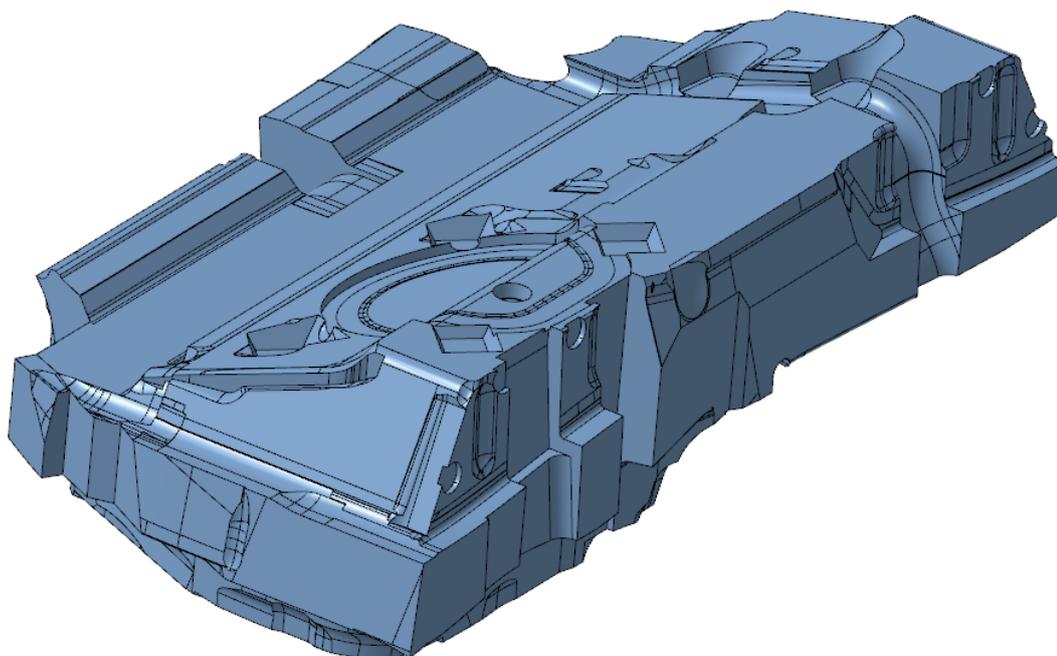


Рисунок 9 – Пример окружения топливного бака (доступный объём)

Рассмотрим процесс создания математической модели корпуса топливного бака при помощи системы автоматизированного проектирования Siemens NX 11.0.

Для начала моделирования корпуса топливного бака следует импортировать полученные от заказчика геометрические ограничения. В случае, если формат исходных данных не соответствует формату NX (файлы с расширением .prt), следует импортировать исходные данные при помощи функции «Импорт» (Меню → Файл → Импорт), выбрав соответствующий формат исходных данных.

После загрузки исходных данных, следует определить базовую плоскость, на базе которой будет производиться дальнейшее построение. Для этого следует выбрать функцию «Координатная плоскость» (Меню → Вставить → База/точка → Координатная плоскость). Затем, выбрав из доступных вариантов (рисунок 10), создать плоскость, привязавшись к существующей геометрии исходных данных или одной из базовых плоскостей.

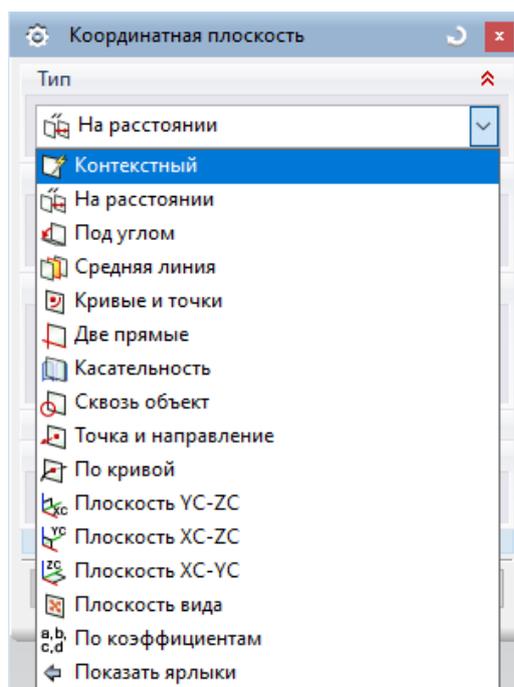


Рисунок 10 – Варианты создания координатной плоскости

Следующим шагом необходимо создать на данной плоскости эскиз (Меню → Вставить → Эскиз), который облегчит создание исходного твердого тела-заготовки для корпуса топливного бака. При помощи инструментов эскиза (рисунок 11), очерчиваем контур будущей фигуры, заведомо большего размера, нежели исходные геометрические ограничения. Контур может быть прямоугольной, трапецевидной или иной формы, в зависимости от отведенного заказчиком рабочего пространства. Также, при необходимости, элементы эскиза могут быть параметризованы и подвергнуты ограничениям (рисунок 12). После завершения геометрических построений, следует нажать кнопку «Закончить эскиз».

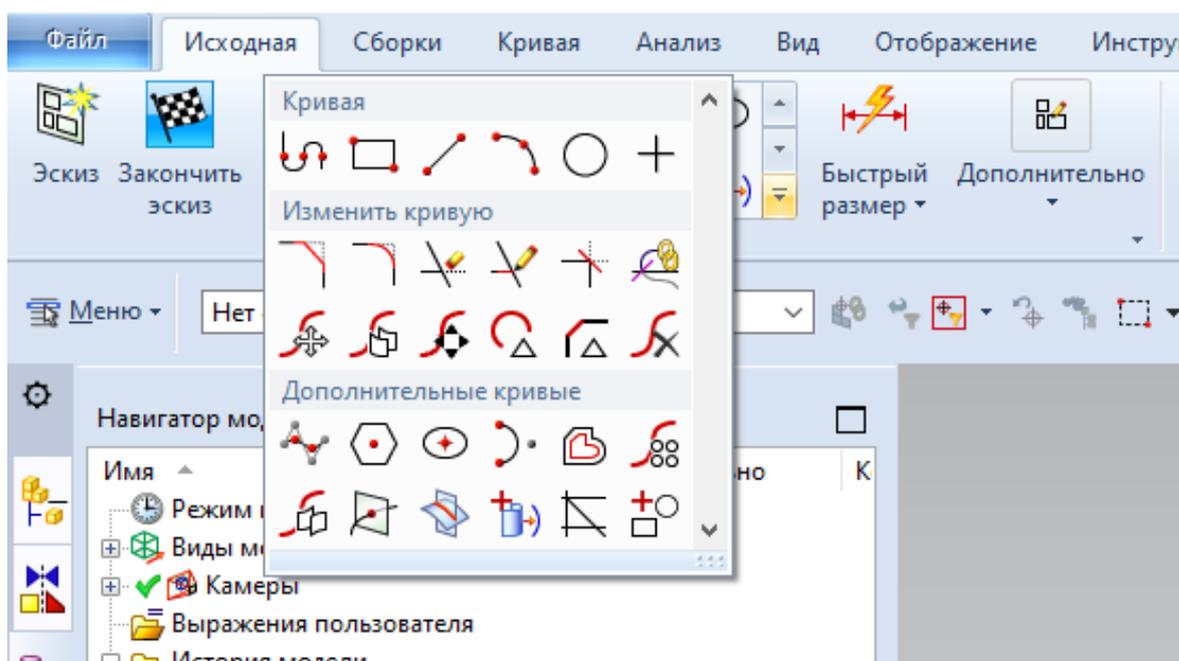


Рисунок 11 – Инструменты геометрических построений эскиза в Siemens NX 11.0

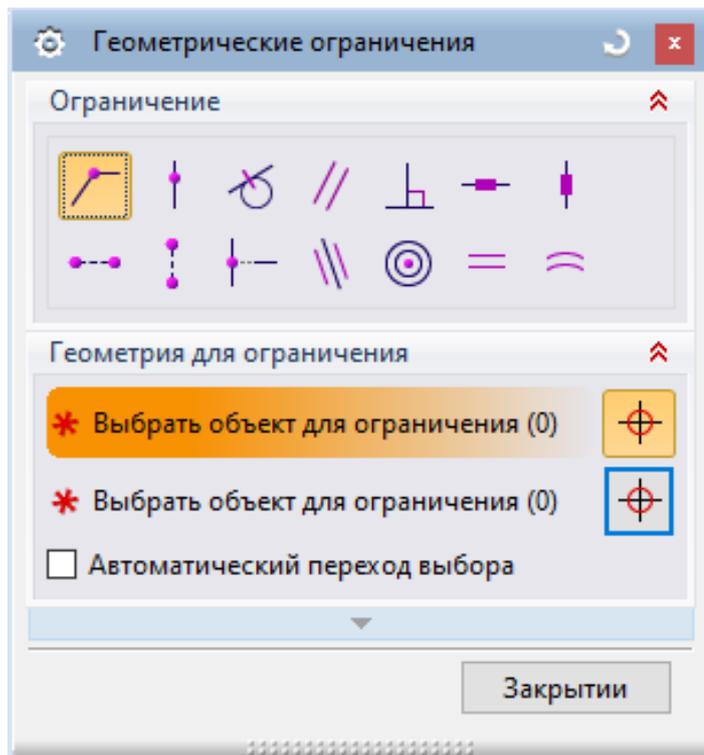


Рисунок 12 – Окно геометрических ограничений эскиза в Siemens NX 11.0

Далее необходимо придать толщину плоскому контуру, сформированному при помощи команды «Эскиз» [8]. Для этого необходимо выбрать команду «Вытягивание» (Меню → Вставить → Конструктивный элемент → Вытягивание). Выбрать требуемый контур, определить вектор, вдоль которого необходимо осуществить придание толщины, и задать значение, превышающее отведенное в исходных данных. В настройках выставить тип тела – «Тело», для получения полнотелой геометрии заготовки (рисунок 13).

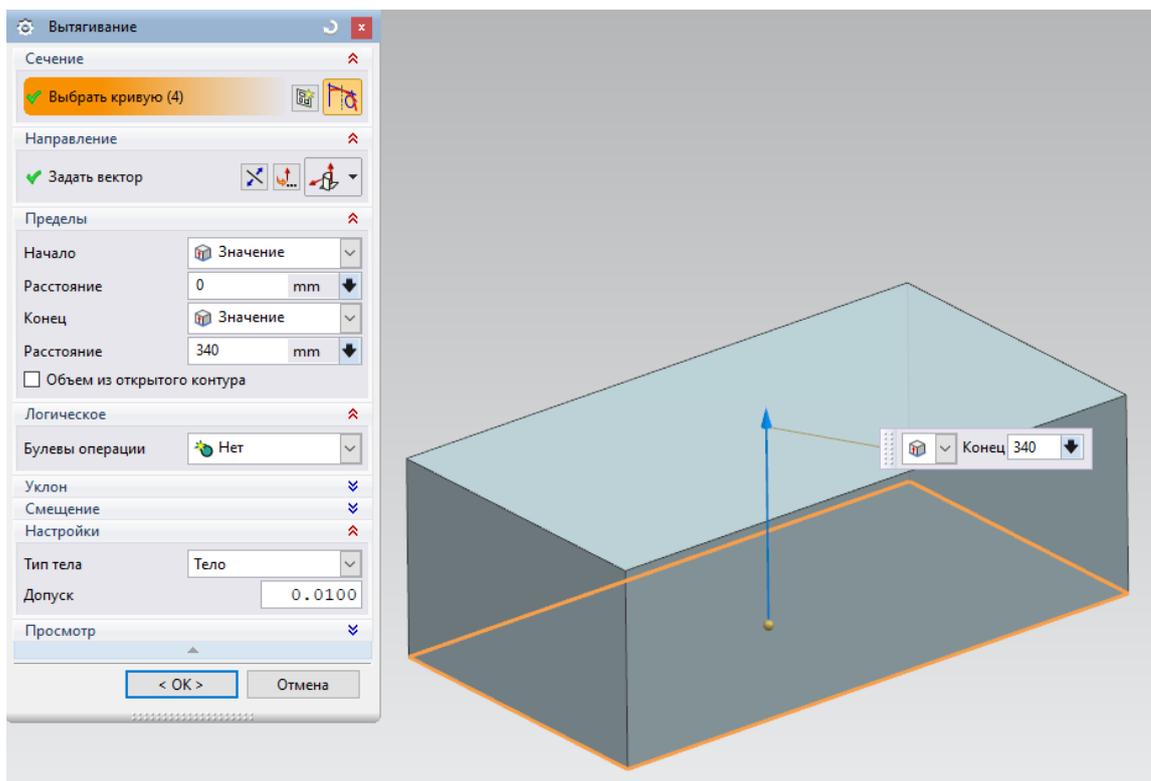


Рисунок 13 – Операция «Вытягивание» в Siemens NX 11.0

После получения твердотельного элемента, необходимо провести первичное, грубое отсечение массы тела, приблизив геометрию тела к отведенному под проектирование объему. Для этого следует спроецировать кривые с исходных данных (элементов кузова или твердотельного объема) на базовую плоскость при помощи функции «Проецирование» (Меню → Вставить → Кривая по кривой → Проецирование). При нехватке спроецированных линий, можно воспользоваться функциями построения кривых (вне эскиза, Меню → Вставить → Кривая). Затем полученный контур нужно вытянуть в нужном направлении, сменив тип тела на «Лист». Полученной в результате поверхностью без толщины следует обрезать заготовку по контуру или по одной из сторон при помощи функции «Обрезка тела» (Меню → Вставить → Обрезка → Обрезка тела, рисунок 14).

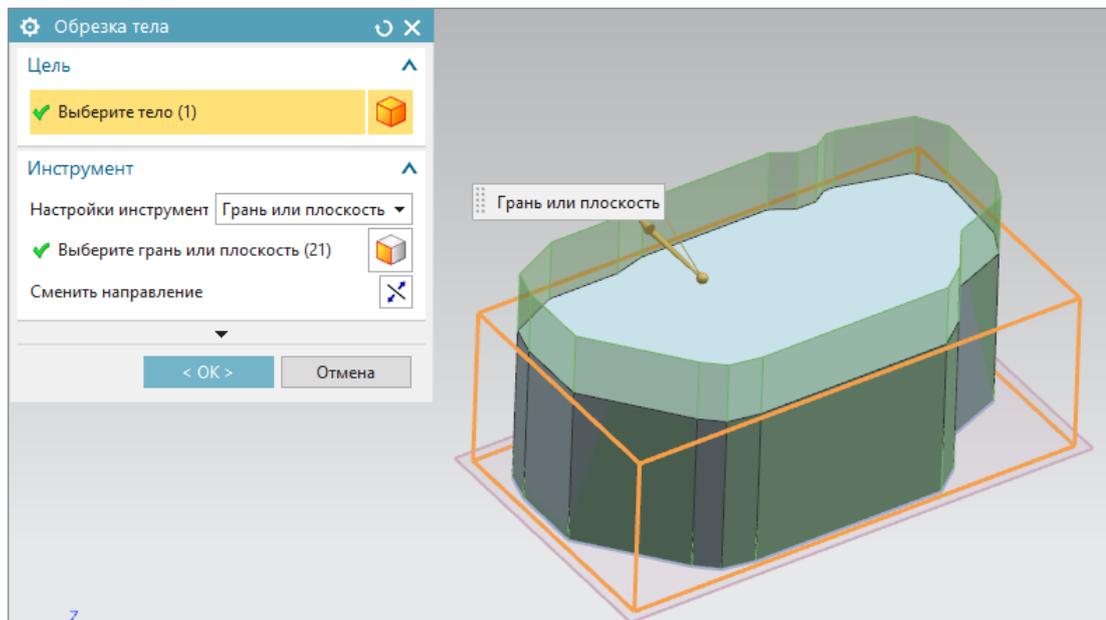


Рисунок 14 – Операция «Обрезка тела» в Siemens NX 11.0

Операцию обрезки заготовки следует повторить многократно, отсекая лишние части тела с разных сторон и в разных направлениях, используя геометрию из выделенного под проектирование объема как ссылочную. Для получения дополнительных геометрических построений, необходимых для придания заготовке требуемой формы, могут быть полезны нижеперечисленные команды:

- «Поверхность обрезки» (Меню → Вставить → Обрезка → Поверхность обрезки);
- «Расширить поверхность» (Меню → Вставить → Обрезка → Расширить поверхность);
- «Обрезка и расширение» (Меню → Вставить → Обрезка → Обрезка и расширение);
- «Смещение поверхности» (Меню → Вставить → Смещение/масштаб → Смещение поверхности);
- «Переменное смещение» (Меню → Вставить → Смещение/масштаб → Переменное смещение);

- «Мостик» (Меню → Вставить → Элементы детали → Мостик);
- «По сетке кривых» (Меню → Вставить → Поверхность по сетке кривых → По сетке кривых).

Полученный результат чернового отсечения можно наблюдать на рисунке 15.

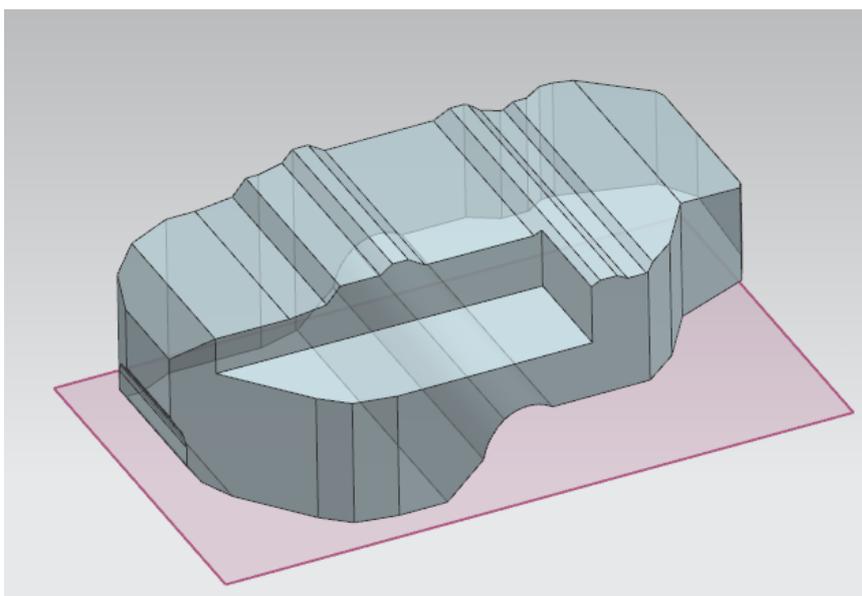


Рисунок 15 – Результат черновой обрезки твердотельной заготовки

Полученный результат требует тщательной доводки с целью исключения пересечения корпуса топливного бака с элементами окружения, выполнения минимальных зазоров от окружения до стенок топливного бака, создания предварительной концепции размещения всех необходимых для функционирования компонентов топливного бака. Для этого следует применять вышеуказанные операции, а также другие, доступные в модуле «Моделирование» Siemens NX 11.0 и их комбинации. Результат построений представлен на рисунке 16.

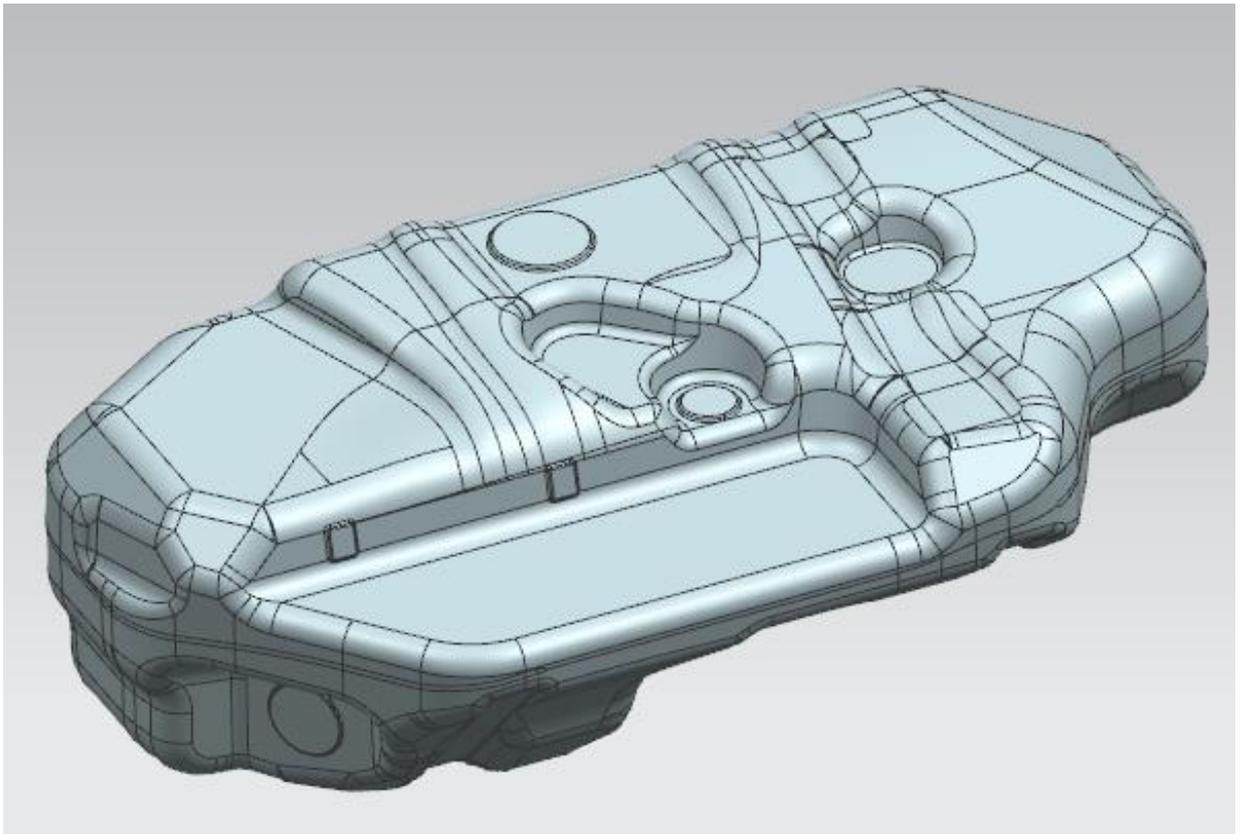


Рисунок 16 – Результат построений внешней оболочки корпуса топливного бака

После окончательной доводки геометрии корпуса топливного бака по форме, следует придать твердотельной модели толщину, соответствующую реальной. В пластиковых топливных баках толщина, как правило, неоднородна, что вызвано особенностями процесса выдувного формования. Однако значение усредненной толщины топливного бака подобных габаритных размеров, как правило, принимается 5 мм.

Осуществить придание толщины в Siemens NX 11.0 можно несколькими способами:

- При помощи команды «Утолщение» (Меню → Вставить → Смещение/масштаб → Утолщение). Для этого нужно изначально «снять» поверхностный слой с твердотельного изделия, для получения поверхностей с нулевой толщиной, при помощи команды

- «Выделить геометрию» (Меню → Вставить → Ассоциативная копия → Выделить геометрию). После чего вызвать команду «Утолщение», выбрать поверхности нулевой толщины и задать требуемую толщину;
- При помощи команды «Тонкостенное тело» (Меню → Вставить → Смещение/масштаб → Тонкостенное тело);
 - При помощи команды «Вычитание» (Меню → Вставить → Комбинировать → Вычитание). Для этого сперва нужно вызвать команду «Смещение поверхности» (Меню → Вставить → Смещение/масштаб → Смещение поверхности), выбрать все наружные поверхности твердотельного изделия и сместить их на требуемую величину вглубь детали. Затем при помощи команды «Сшивка» (Меню → Вставить → Комбинировать → Сшивка) соединить смещенные поверхности. При отсутствии разрывов свыше указанного допуска, должно получиться твердое тело. После чего, вызвав команду «Вычитание», вычесть из большего тела меньшее, не сохраняя инструмент вычитания. Результат построений корпуса топливного бака с толщиной стенки 5 мм показан на рисунке 17 при помощи сечения.

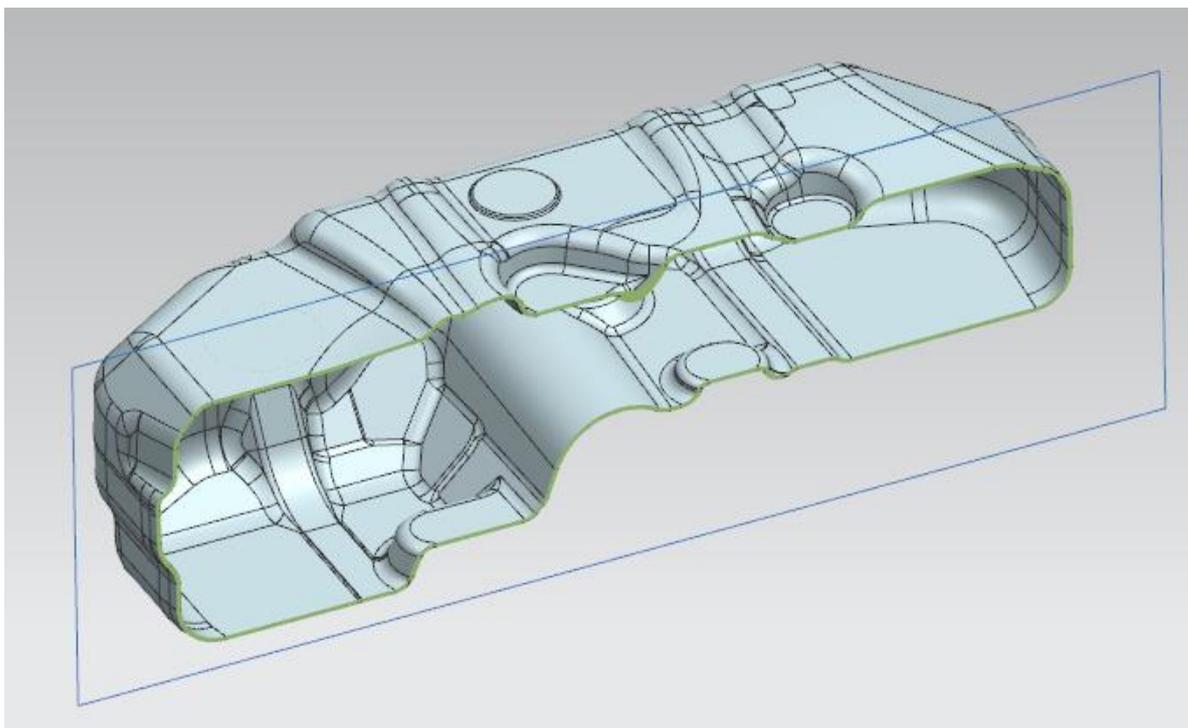


Рисунок 17 – Результат построений корпуса топливного бака с толщиной стенки

Не существует единственного верного пути построения объемного тела с толщиной стенки, САПР Siemens NX 11.0 позволяет прийти к необходимому результату множеством способов исходя из сложности изделия, качества ссылочной геометрии, а также навыков конкретного конструктора.

Следующим этапом после получения объемного тела с толщиной идет вырезка технологических отверстий для размещения в последующем необходимых компонентов. Для этого следует воспользоваться командами «Эскиз», «Вытягивание», «Вычитание», либо специальной командой «Отверстие» (Меню → Вставить → Конструктивный элемент → Отверстие). Результат вырезки отверстий представлен на рисунке 18.

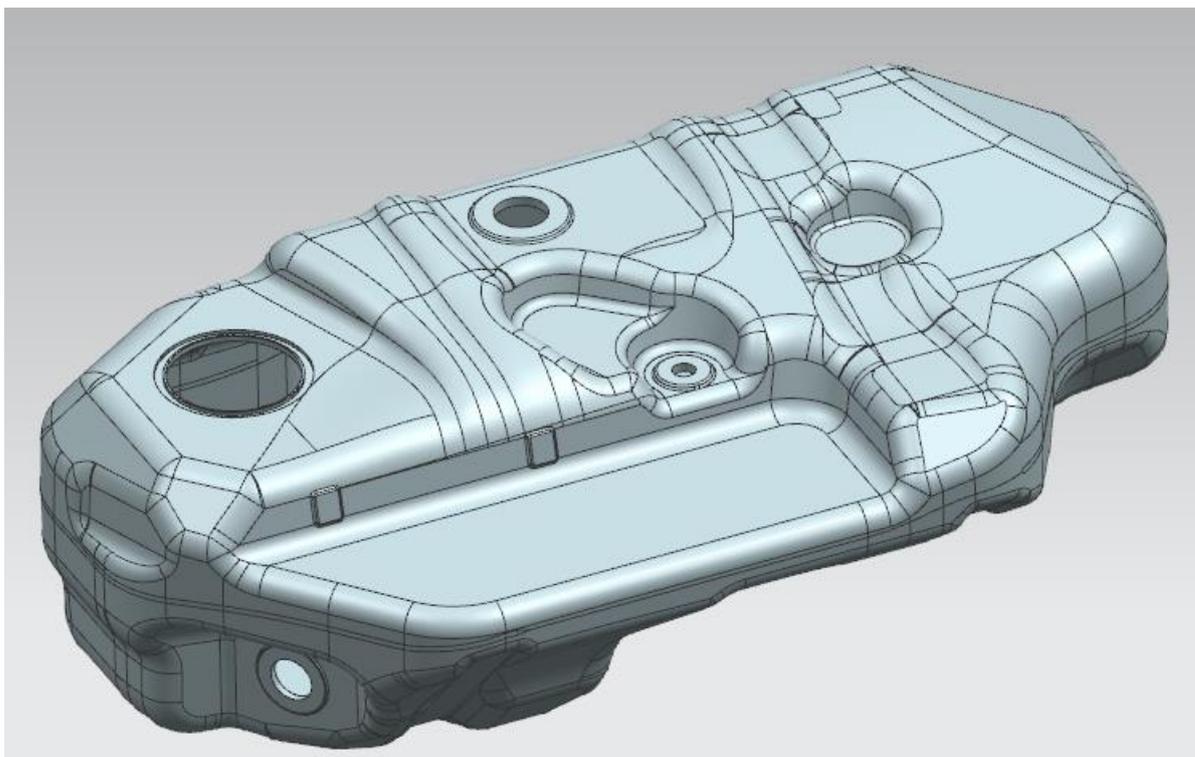


Рисунок 18 – Результат вырезки отверстий в корпусе топливного бака

По завершении моделирования корпуса топливного бака, необходимо разработать закладную деталь – внутреннюю перегородку, располагающуюся внутри корпуса бака [24].

При разработке перегородки следует применять ранее описанные команды, такие как «Эскиз», «Вытягивание», «Вычитание», «Обрезка тела». Внутренние поверхности корпуса топливного бака должны быть использованы как ссылочные для зон погружения перегородки в тело бака, имитирующих его впавление. При разработке перегородки следует предусмотреть технологические элементы, за которые деталь будет переноситься и закрепляться в выдувной форме, а также локальные утонения перегородки возле каждого места впавления его в тело корпуса бака, с целью её контролируемого слома и минимизации влияния на поверхность корпуса бака при воздействии ударной нагрузки на топливный бак.

Трёхмерная модель внутренней перегородки топливного бака представлена на рисунке 19.

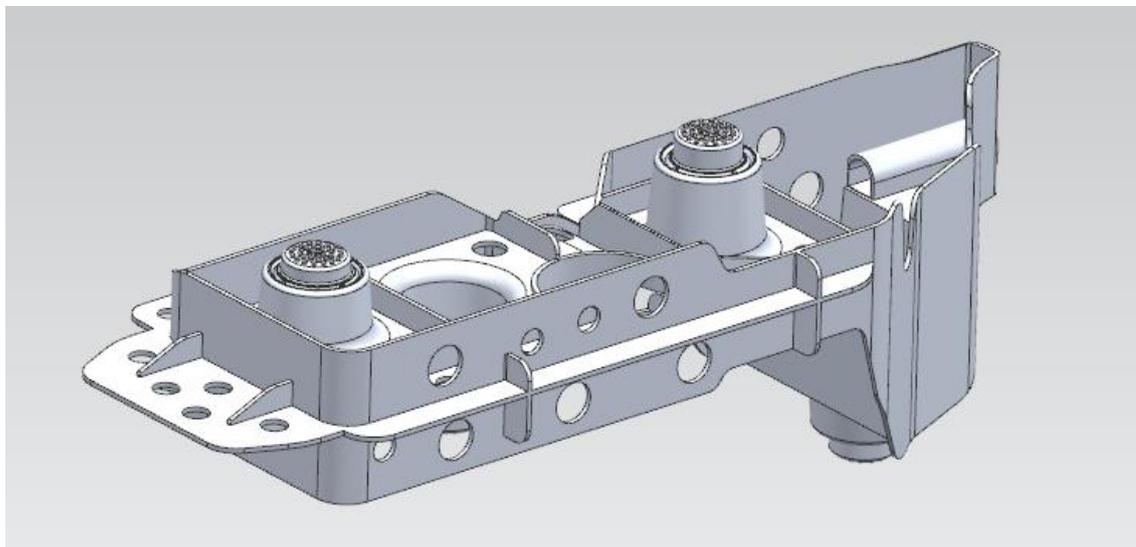


Рисунок 19 – Внутренняя перегородка топливного бака

Остальные составляющие компоненты топливного бака в сборе намного более просты в плане геометрических построений, могут быть созданы при помощи рассмотренных ранее или иных доступных в Siemens NX 11.0 команд. Также возможно заимствование трёхмерных моделей из баз данных, предоставляемых производителями компонентов, применяющихся в составе топливного бака.

2.2 Построение в САПР электронной модели сборки топливного бака

Топливный бак в транспортном средстве состоит из нескольких компонентов, в совокупности образующих работоспособную систему, обеспечивающих надежное и безопасное хранение топлива. В зависимости от

требований, предъявляемых к топливному баку, комплектации транспортного средства и других факторов, комплектация бака в сборе может варьироваться. Приведем ниже основные компоненты топливного бака в сборе [7]:

- Вентиляционный клапан, позволяющий воздуху поступать и выходить из топливного бака при изменении уровня топлива, предотвращающий повышение давления или образование вакуума в баке;
- Наливная горловина, через которую топливо поступает непосредственно в корпус топливного бака. Может быть приварена к топливному баку отдельно или в составе наливной трубы;
- Вентиляционный ниппель, обеспечивающий выход воздуха из бака и ограничивающий уровень топлива;
- Модуль электробензонасоса в сборе, отвечающий за забор топлива из бака и подачу его в двигатель;
- Топливный фильтр. Может размещаться как на самом баке, так и быть встроенным в насос;
- Топливопроводы. Представляют собой полимерные трубки или резиновые шланги, соединяющие компоненты бака между собой или с интерфейсами транспортного средства;
- Стальные или пластиковые фиксирующие кольца. Применяются для сборки и затяжки модуля электробензонасоса в сборе;
- Резиновые уплотнительные кольца, служащие для герметизации соединений.

В рассматриваемом в данной работе случае бак состоит из следующих компонентов:

- Корпус топливного бака с интегрированной внутренней перегородкой;
- Закладное стальное кольцо;
- Наливная горловина;

- Вентиляционный клапан;
- Вентиляционная трубка в сборе с вентиляционным ниппелем;
- Кронштейны крепления трубки в количестве двух штук.

Произведем размещение перечисленных выше компонентов в пространстве, объединив их в сборку [8]. В Siemens NX 11.0 работа со сборками осуществляется при помощи активации специального модуля «Сборки» (вкладка «Приложение» → «Сборки»). После подключения указанного модуля, в панели инструментов активируется дополнительная вкладка «Сборки». Добавление новых компонентов можно производить при помощи команды «Добавить» или «Создать новый», добавляя компоненты сборки из числа уже созданных, либо создавая новый компонент непосредственно в файле сборки. В рассматриваемом случае компоненты топливного бака в сборе уже были созданы заранее. Модуль «Сборки» имеет и другие команды для работы с компонентами сборки, приведем описание некоторых из них:

- «Переместить компонент». Перемещает компонент в сборке;
- «Массив компонентов». Копирует компонент в указанный массив;
- «Зеркальная сборка». Создает отраженную версию полной сборки или выбранных компонент;
- «Разнесенные виды». Позиционирует и запоминает положение компонентов так, чтобы создать разнесенный вид;
- «Редактор геометрических связей WAVE». Копирует геометрию из других деталей в сборке в рабочую деталь;
- «Анализ зазоров». Проверяет зазоры и пересечения между сопрягаемыми компонентами сборки.

Выбрав команду «Добавить», выберем из соответствующей директории файл корпуса топливного бака, как образующий сборку компонент. Разместим его в начало абсолютной системы координат. На рисунке 20 представлено

окно добавления компонента сборки с возможностью предварительного просмотра и задания других параметров добавления компонента.

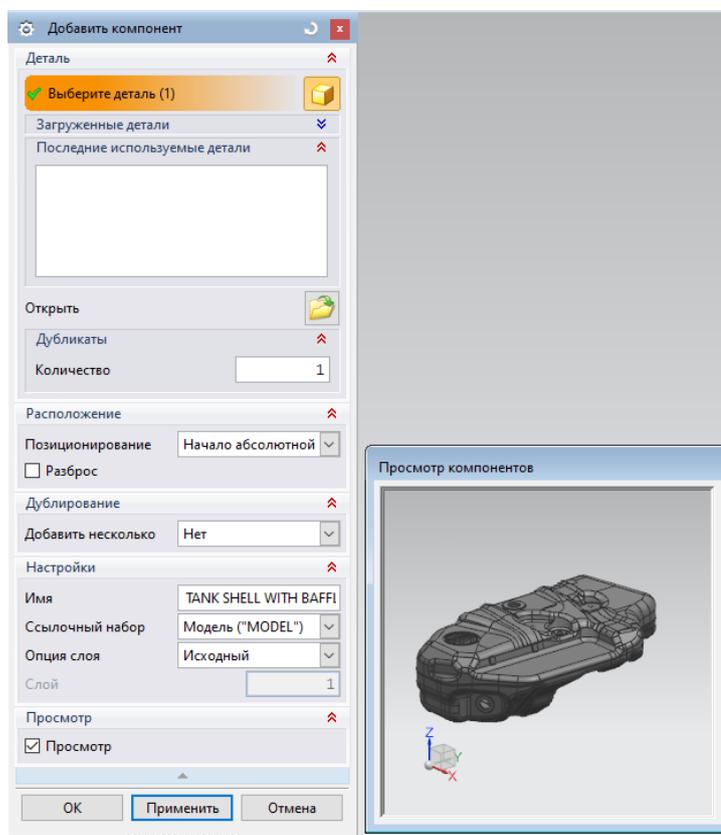


Рисунок 20 – Окно добавления компонента сборки

После размещения в пространстве сборки основного компонента, произведем добавление и позиционирование остальных компонентов топливного бака в сборе. Позиционирование компонентов наиболее просто можно осуществить при помощи выбора опции «По сопряжениям» или «Переместить» поля «Позиционирование» окна добавления компонента сборки (рисунок 21)

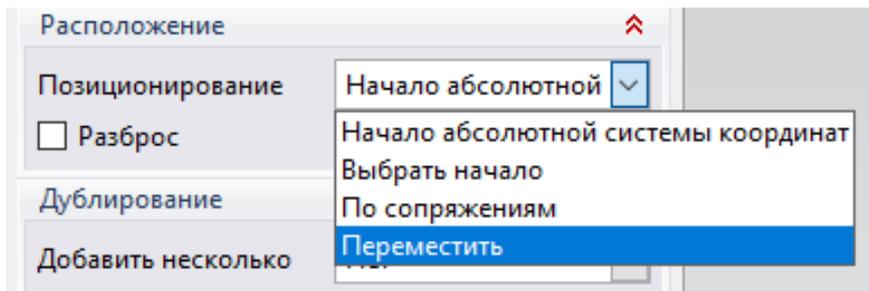


Рисунок 21 – Варианты позиционирования компонентов сборки

При позиционировании при помощи сопряжений, необходимо задавать геометрические ограничения, накладываемые на элементы сопрягаемых компонентов, такие как «Концентричность», «Параллельность», «Перпендикулярность», «Фиксация» и т.д. (рисунок 22).

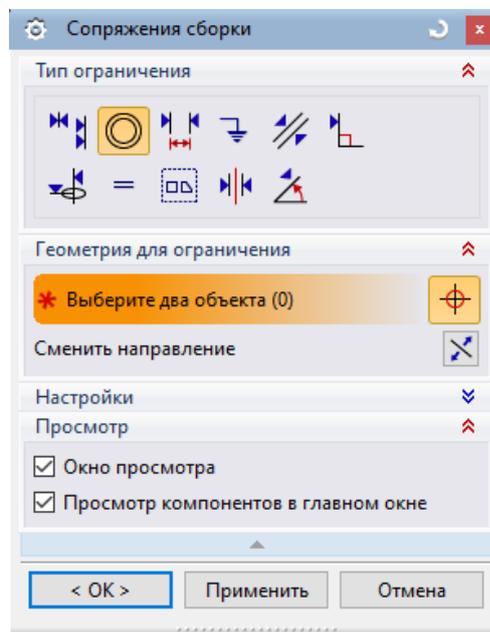


Рисунок 22 – Окно позиционирования компонентов сборки по сопряжениям

При позиционировании перемещением необходимо задать положение компонента в пространстве используя доступные возможности, такие как

динамическое перемещение, перемещение на заданное расстояние, поворот на заданный угол, совмещение двух точек, совмещение двух систем координат и другие (рисунок 23).

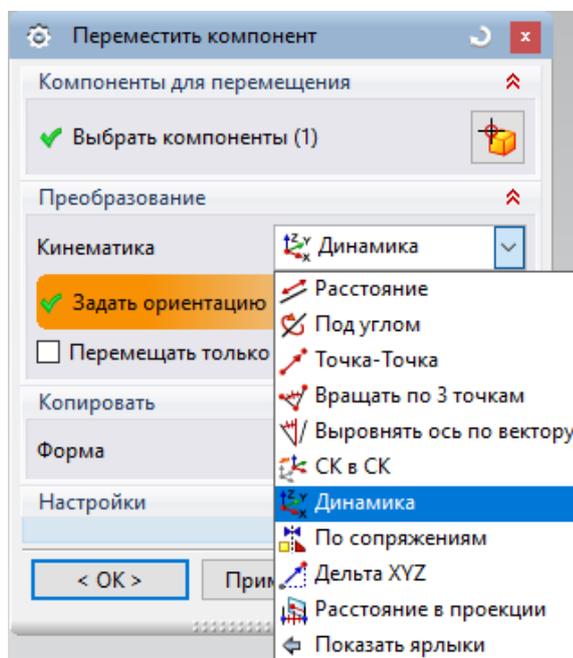


Рисунок 23 – Окно позиционирования компонентов сборки перемещением

Позиционирование по сопряжениям более трудоёмкое, нежели позиционирование перемещением. Однако имеет преимущество, заключающееся в том, что при перемещении любого компонента, имеющего ограничения и взаимосвязи, все остальные компоненты перемещаются вместе с ним, не меняя своего первоначального положения относительно друг друга. Либо перемещаются, изменяя свое положение в зависимости от заданных ограничений.

Для сборки с небольшим количеством компонентов, как в рассматриваемом случае, применим позиционирование по перемещениям. Результат формирования сборки топливного бака представлен на рисунке 24.

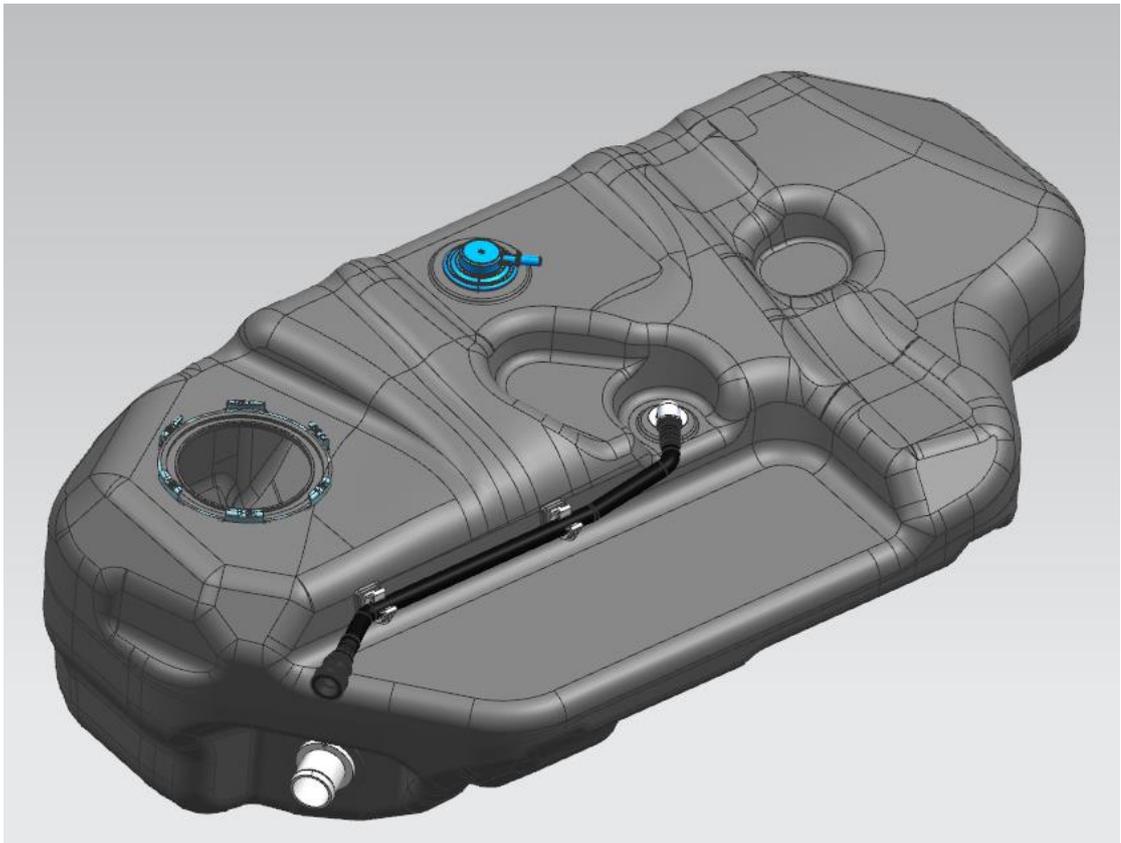


Рисунок 24 – Топливный бак в сборе

2.3 Совершенствование электронной модели топливного бака в САПР

Заявленной целью данной работы является создание методики совершенствования конструкции корпусов топливных баков, позволяющей экономить сырьё, за счет исключения из состава топливного бака внутренней перегородки. Так как в рассматриваемом случае перегородка выполняет не только ограничивающую перемещение топлива функцию, но и придает конструкции необходимую жёсткость, не позволяя корпусу топливного бака чрезмерно расширяться или сжиматься при воздействии давления внутри бака, при совершенствовании необходимо учесть это в первую очередь. Усовершенствуем исходную 3D модель корпуса топливного бака за счет

исключения перегородки и введения специальной зоны смыкания материала верхней и нижней частей корпуса, которая должна придать конструкции требуемую жёсткость, а также будет способствовать ограничению чрезмерного перемещения топлива.

Изменение электронной модели существующей конструкции в Siemens NX 11.0 можно выполнить несколькими способами, при помощи инструментов поверхностного [11] и твердотельного моделирования. Рассмотрим один из них, на примере доработки 3D модели корпуса топливного бака, уже имеющего толщину стенки.

Для начала удалим из состава 3D модели внутреннюю перегородку, выделив её в рабочей области модели или в дереве построения и нажав клавишу «Delete». Затем определим место внедрения зоны смыкания. С целью минимизации изменений выдувной формы, частично используем геометрию, задействовавшуюся под вплавление перегородки. Одна из площадок расположена приблизительно по центру бака относительно осей X и Y (поверхность отмечена зеленым цветом, рисунок 25), выберем её для начала внесения изменений.

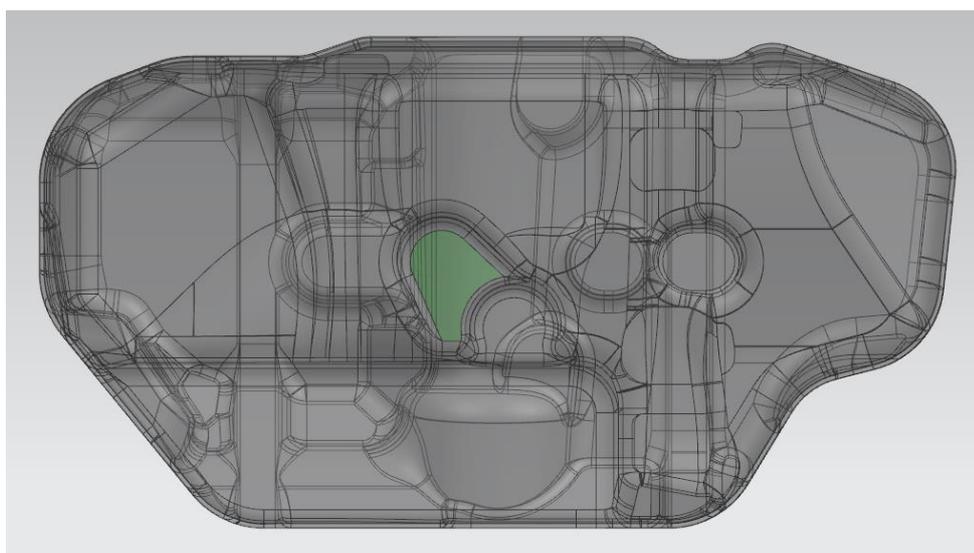


Рисунок 25 – Зона начала изменения модели корпуса топливного бака

Создадим плоскость на расстоянии от выбранной в качестве стартовой поверхности и зададим расстояние смещения таким образом, чтобы поверхность располагалась приблизительно посередине внутренних поверхностей бака (рисунок 26).

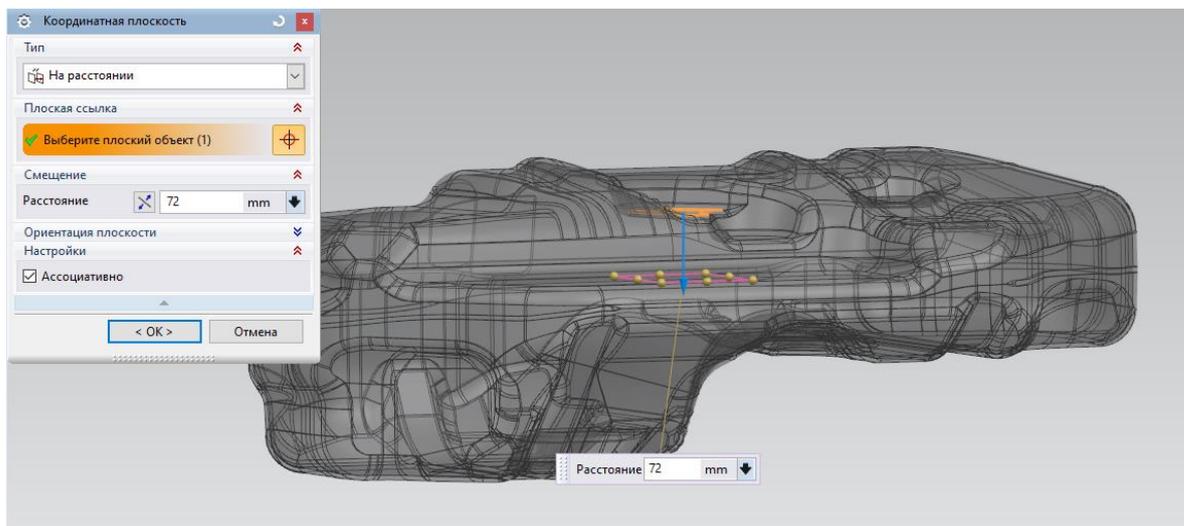


Рисунок 26 – Создание новой плоскости

Создадим на полученной плоскости эскиз, в эскизе начертим окружность диаметром 40мм, привязываясь к центру дуги стартовой поверхности. Затем при помощи команды «Вытягивание» произведем вытягивание данной окружности по оси Z и $-Z$ на расстояние, заведомо выходящее за пределы корпуса топливного бака как сверху, так и снизу. Значения начала вытягивания каждого тела подберем таким образом, чтобы зазор между двумя ними по оси Z составил 3,5 мм (рисунок 27).

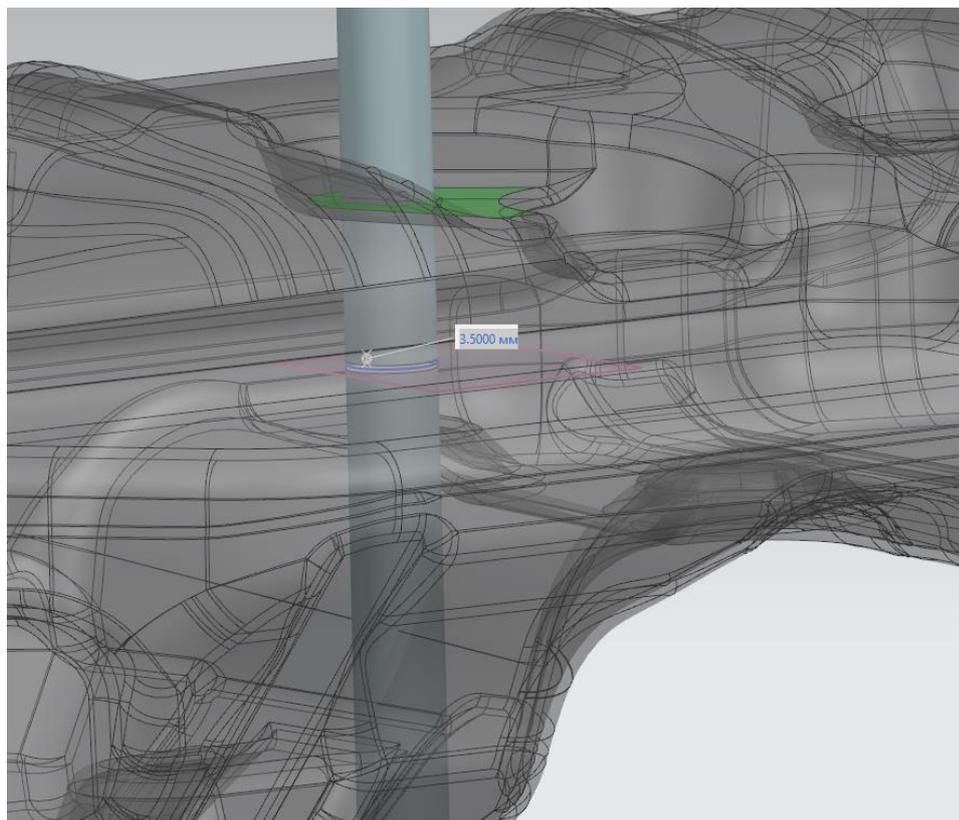


Рисунок 27 – Создание двух тел вытягивания с зазором между ними

При помощи команды «Уклон» (Меню → Вставить → Элементы детали → Уклон) задаем уклон граней тел таким образом, чтобы увеличение диаметра полученного в результате усеченного конуса шло по направлению $+Z$ для верхнего тела и по $-Z$ для нижнего, выбирая подвижные и неподвижные грани и задавая значение уклона (рисунок 28).

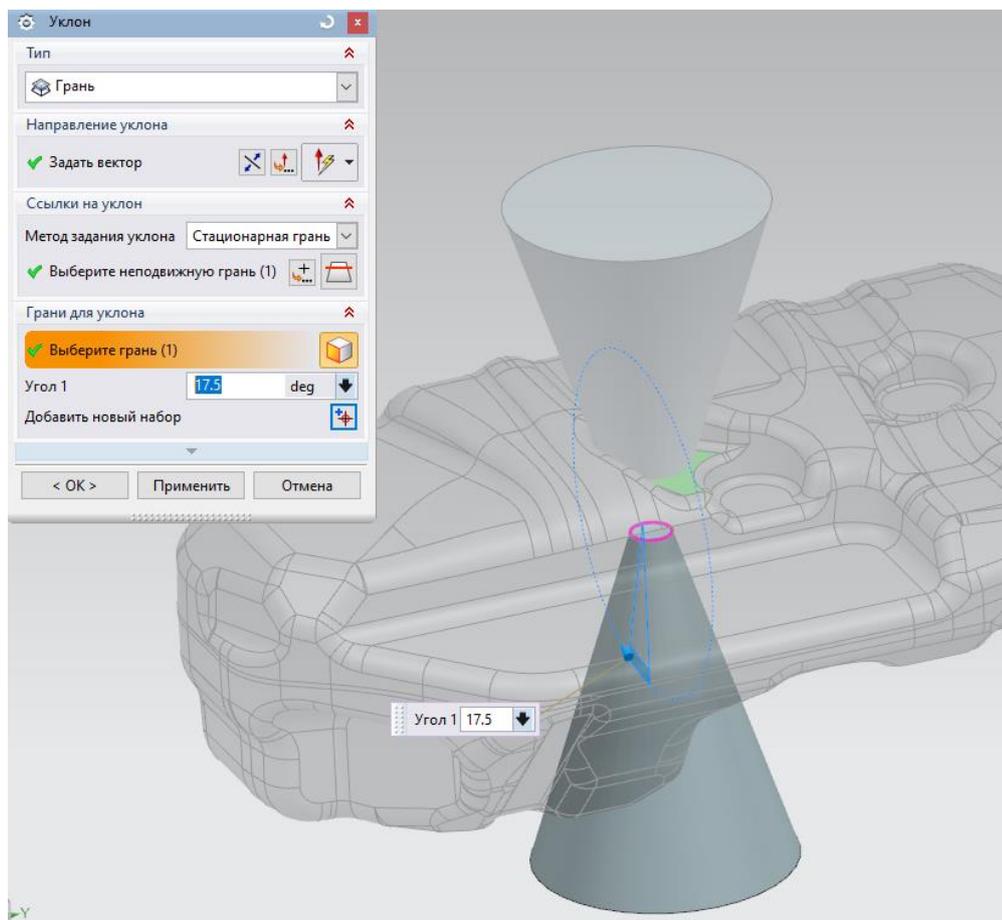


Рисунок 28 – Задание уклона граней тел

Выделим из полученных усеченных конусов наружную грань (Меню → Вставить → Ассоциативная копия → Выделить геометрию) и сместим её на величину принятой толщины стенки корпуса топливного бака (5 мм) при помощи команды «Смещение поверхности». Построим скругление двух смещенных поверхностей при помощи команды «Скругление поверхностей» (Меню → Вставить → Элементы детали → Скругление поверхностей), получив таким образом единое листовое тело (рисунок 29).

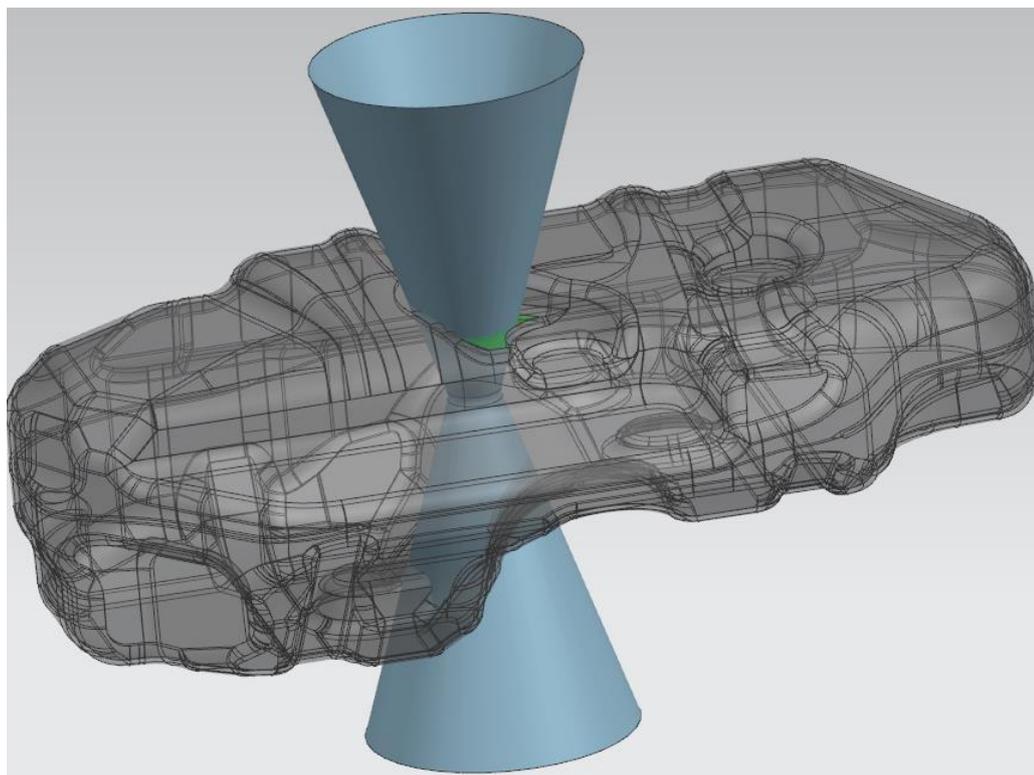


Рисунок 29 – Единое листовое тело

Придадим толщину полученному листовому телу на величину принятой толщины стенки корпуса топливного бака (5 мм) при помощи команды «Утолщение», получив таким образом черновое тело зоны смыкания. Для осуществления дальнейших операций обрезки тел, необходимо получить вспомогательную геометрию. Выделим прилегающие к утолщенному листовому телу поверхности с корпуса топливного бака при помощи команды «Выделить геометрию», объединим их в единые листовые тела при помощи команды «Сшивка» и зададим розовый цвет для наглядности (рисунок 30).

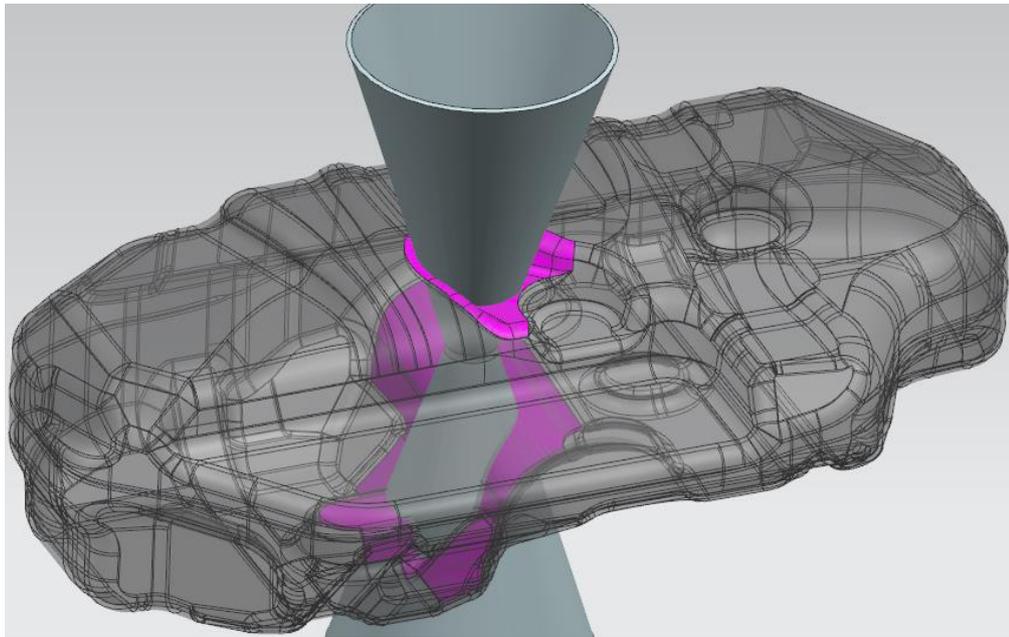


Рисунок 30 – Создание вспомогательной геометрии

Обрежем черновое тело зоны смыкания при помощи полученных поверхностей (рисунок 31).

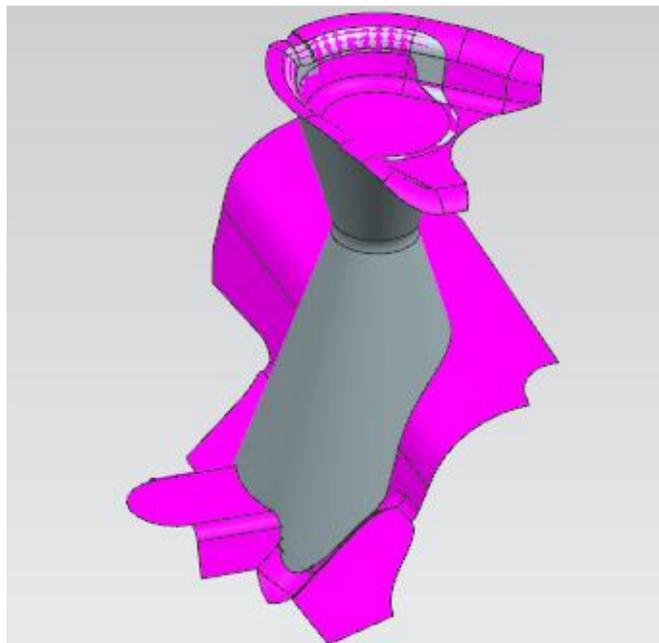


Рисунок 31 – Результат обрезки тела зоны смыкания

Обрежем тело корпуса топливного бака при помощи листового тела, посредством утолщения которого было получена черновая геометрия зоны смыкания (рисунок 32).

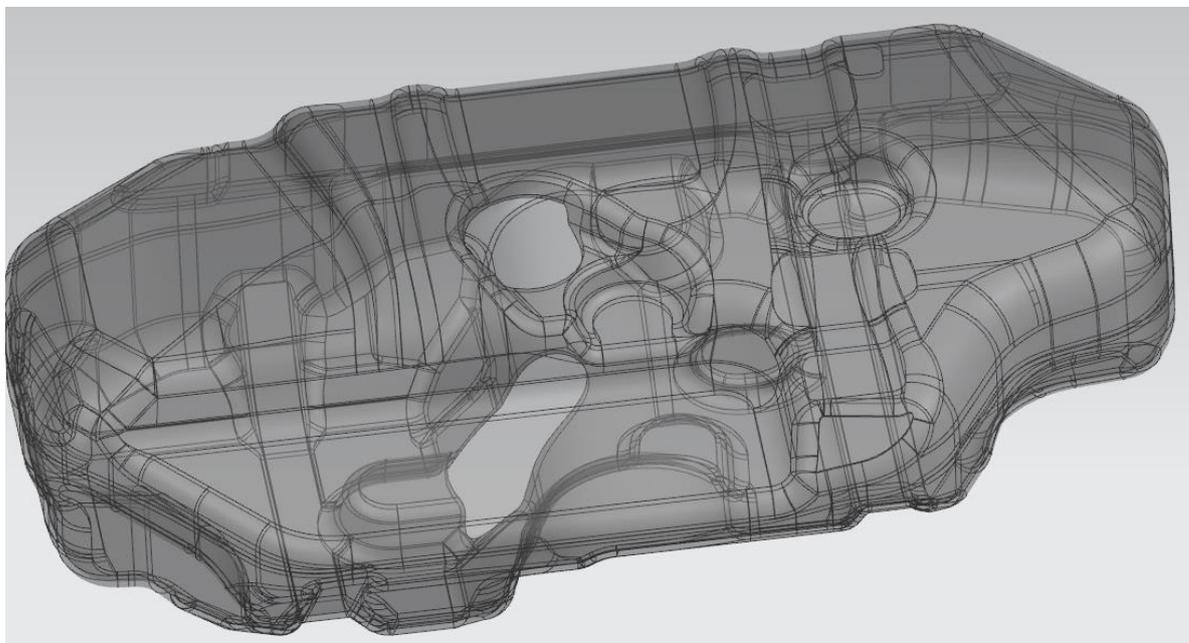


Рисунок 32 – Результат обрезки корпуса топливного бака

Объединим тело обрезанного корпуса топливного бака и обрезанное тело зоны смыкания. Вернувшись к исходному эскизу, восстановим перемычку зоны смыкания, толщиной 3,5 мм и также объединим с телом корпуса топливного бака. После объединения всех тел, зададим необходимые радиусы скругления полученных в результате геометрических построений острых углов. Результат совершенствования корпуса топливного бака представлен на рисунке 33.

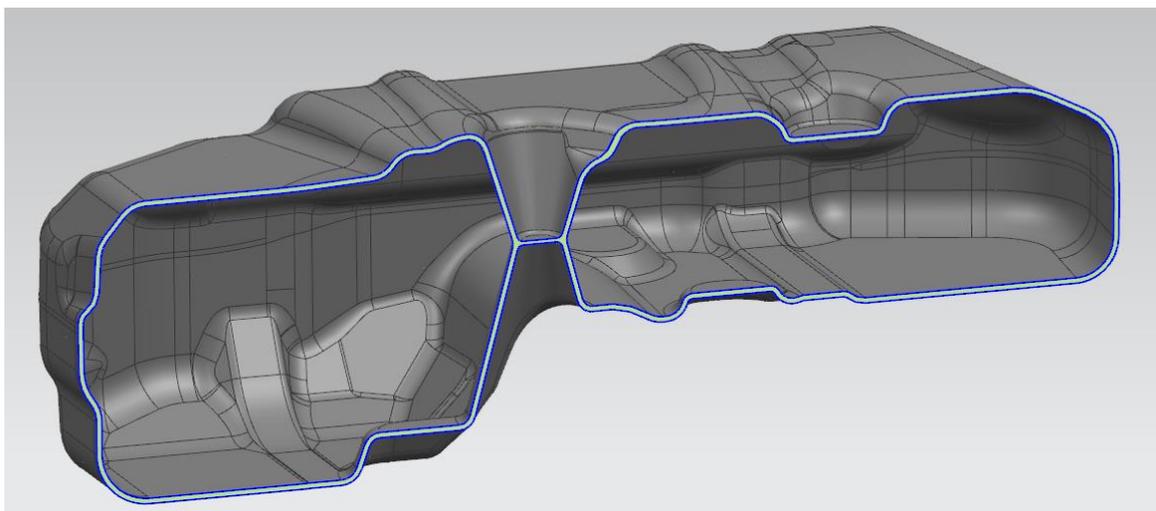


Рисунок 33 – Результат совершенствования корпуса топливного бака – введение зоны смыкания

После проведения совершенствования электронной модели корпуса топливного бака, необходимо провести сравнение масс двух созданных вариантов конструкции. Для этого трёхмерным моделям корпусов следует присвоить материал, физико-механические свойства которого максимально приближены к существующей марке. В данном случае для сравнительного анализа масс был присвоен созданный материал HDPE, имеющий характеристики специально разработанных для производства топливных баков марок. Детальный процесс создания материала рассмотрен в следующем разделе. Результаты сравнения масс получены посредством использования инструмента «Измерение тела» (Меню → Анализ → Измерение тела) и занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительные данные по весу корпусов топливных баков

-	Вариант с перегородкой	Вариант без перегородки
Масса, кг	7,25	6,36

Как видно из таблицы, исключение из состава корпуса топливного бака внутренней перегородки позволяет сэкономить 0,89 кг полиэтилена высокой плотности, что является существенным значением (12,3% от веса корпуса рассматриваемого топливного бака).

Выводы:

- Разработаны трёхмерные электронные модели корпуса топливного бака, его внутренней перегородки, а также описан процесс их создания;
- Построена трёхмерная сборка топливного бака в сборе, с входящими в его состав компонентами, и описан процесс их добавления и позиционирования в сборке;
- Произведено совершенствование электронной модели корпуса топливного бака, заключающееся в удалении из конструкции внутренней перегородки и внедрение зоны смыкания взамен, также описан процесс его осуществления. Результатом совершенствования является конструкция корпуса топливного бака, имеющая на 12,3% меньший вес, нежели исходный вариант (с применением внутренней перегородки);
- Получены два варианта конструкции корпусов топливных баков, отличающиеся наличием или отсутствием в составе внутренней перегородки, пригодные для проведения инженерного анализа и сравнения полученных результатов.

3 Инженерный анализ характеристик топливного бака в САПР

3.1 Описание метода конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод, используемый для решения разнообразных инженерных задач, связанных с расчетами напряжений, деформаций и тепловых полей. Он широко применяется в различных областях, таких как механика твердого тела, теплопроводность, электромагнетизм и другие.

Основная идея МКЭ заключается в представлении сложной структуры (например, твердого тела или детали конструкции) в виде конечного числа более простых подструктур, называемых конечными элементами. Эти элементы соединены узлами, и на основе уравнений равновесия и критериев допустимых деформаций строится система линейных уравнений, описывающая поведение всей структуры.

Основные этапы метода конечных элементов включают [17]:

1. Дискретизация: разделение сложной геометрии на конечное число более простых элементов;
2. Формулирование уравнений: на основе физических законов и критериев деформации формулируются уравнения, описывающие поведение каждого элемента;
3. Сборка системы уравнений: уравнения для каждого элемента объединяются в общую систему уравнений для всей структуры;
4. Применение граничных условий: учитываются граничные условия, которые могут включать фиксированные точки, приложенные нагрузки и другие ограничения;

5. Решение системы уравнений: система линейных уравнений решается численными методами, такими как метод Гаусса или метод сопряженных градиентов;
6. Оценка результатов: после решения системы уравнений проводится оценка полученных результатов, например, анализ напряжений, деформаций, температурных полей и т.д.

Метод конечных элементов предоставляет инженерам и исследователям мощный инструмент для анализа и проектирования сложных систем, позволяя получать численные решения для широкого спектра физических проблем.

Основные шаги при выполнении инженерного анализа с помощью метода конечных элементов в системах CAE – это (рисунок 34) [3]:

- Создание идеализированной модели. Этот этап соответствует переходу от реальной физической модели к измененной (упрощенной) математической модели;
- Создание конечно–элементной модели (FEM), которой присваиваются свойства материалов или параметры оболочечных или стержневых объектов;
- Создание расчетной модели производится на основании конечно–элементной модели. Для нее определяются конечные и начальные условия и условия контактного взаимодействия;
- Решение системы разрешающих уравнений, которые соответствуют выбранному типу анализа с последующим анализом полученных результатов.

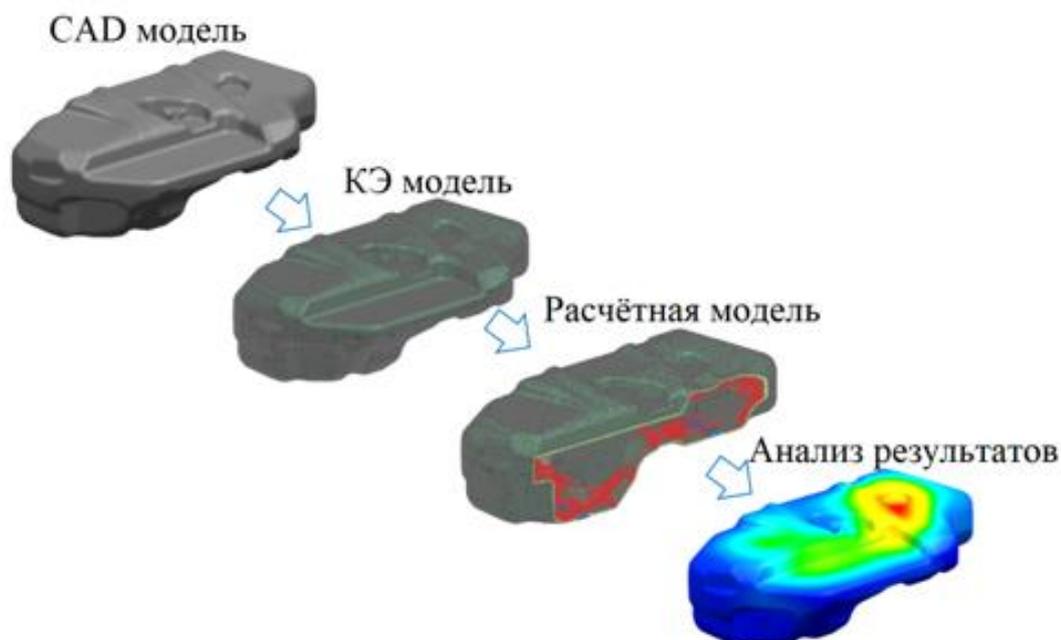


Рисунок 34 – Этапы выполнения инженерного анализа

3.2 Подготовка геометрии электронной модели для проведения инженерного анализа

Перед началом расчета необходимо упростить геометрию электронной модели [3]. Упрощение геометрии является важным этапом при выполнении конечно–элементного анализа по нескольким причинам:

- Вычислительная эффективность: более простая геометрия упрощает расчеты, что улучшает вычислительную эффективность. Сложные геометрические формы могут привести к большому количеству конечных элементов, что требует больше вычислительных ресурсов;
- Уменьшение времени расчета: упрощение геометрии может значительно сократить время, необходимое для проведения анализа. Это особенно важно при выполнении больших и сложных моделирований;

- Улучшение сходимости: простые формы могут способствовать лучшей сходимости численных методов, используемых в конечно-элементном анализе. Сложные формы могут вызывать численные проблемы, такие как неустойчивость или медленную сходимость;
- Повышение точности: иногда упрощение геометрии может улучшить точность решения, особенно если некоторые детали не существенны для конкретного анализа;
- Облегчение построения конечно-элементной модели: простая геометрия может сделать процесс построения конечно-элементной модели более простым и менее трудозатратным. Это особенно важно при работе с большими и сложными проектами.

Тем не менее, при упрощении геометрии важно сохранять существенные особенности структуры, чтобы результаты анализа оставались репрезентативными и применимыми к реальной системе.

Рассмотрим упрощение геометрии на примере варианта корпуса топливного бака без внутренней перегородки. В имеющемся случае целесообразным представляется исключение из электронной модели следующих элементов:

- Сквозные отверстия, т.к. планируемые к проведению симуляционные испытания в случае реальных образцов могут проводиться на баках без отверстий (рисунок 35, позиция 1);
- Возвышения (площадки), необходимые для корректной приварки физических компонентов к корпусу топливного бака, ввиду наличия на них малых радиусов, способных привести к измельчению конечно-элементной сетки и увеличению времени расчёта (рисунок 35, позиция 2).

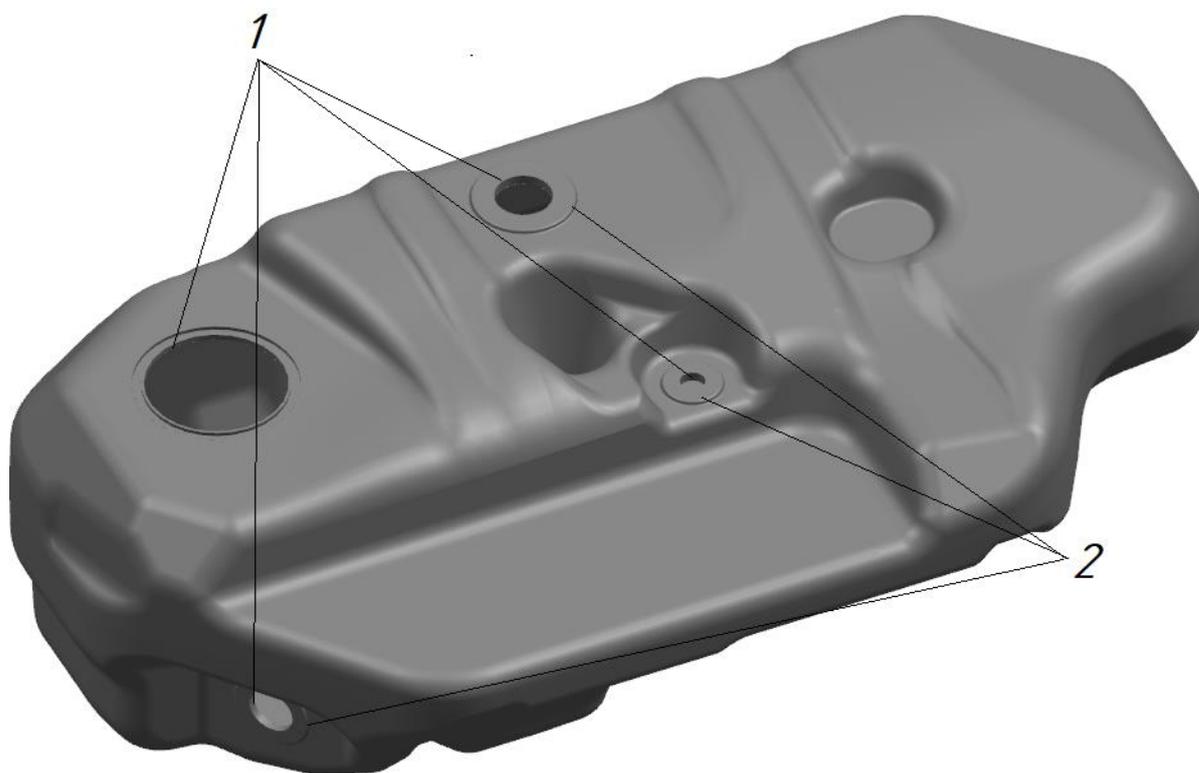


Рисунок 35 – Элементы геометрии, подлежащие исключению

Для осуществления подобного рода изменений подходящим является инструмент «Удалить грань» [13], доступный как в модуле «Моделирование» Siemens NX, так и в модуле «Расширенная симуляция» (Меню → Вставить → Синхронное моделирование → Удалить грань). Корпус топливного бака с выбранными элементами, подлежащими удалению, показан на рисунке 36. Результат упрощения геометрии корпуса топливного бака в варианте без внутренней перегородки показан на рисунке 37.



Рисунок 36 – Выбранные элементы при помощи инструмента «Удалить грань»



Рисунок 37 – Результат упрощения геометрии корпуса топливного бака

3.3 Построение сетки конечных элементов электронной модели бака

Следующим этапом является разбиение модели сеткой конечных элементов, т. е. разделение геометрии на элементы, которые связаны между собой узлами.

Модуль «Расширенная симуляция» позволяет автоматически создавать:

- одномерные (1D) стержневые элементы на ребрах и линиях;
- двумерные (2D) оболочечные элементы на гранях и поверхностях;
- трехмерные (3D) объемные элементы [12].

3D-тетраэдральную сетку рекомендуется использовать для объектов, имеющих сложную геометрическую форму. Используют тетраэдральные элементы первого (СТЕТРА(4)) и второго (СТЕТРА(10)) порядка, содержащие 4 и 10 узлов соответственно (рисунок 38) [17] [25].

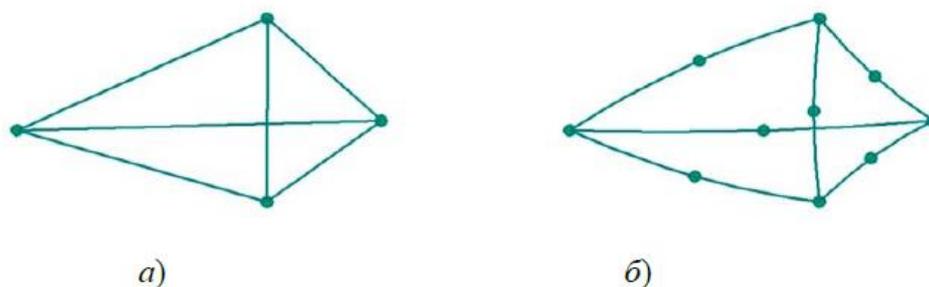


Рисунок 38 – Тетраэдральные элементы первого (СТЕТРА(4)) (а) и второго (СТЕТРА(10)) (б) порядка

Перейти в модуль «Расширенная симуляция» можно через меню Файл → Все приложения → Пре/постпроцессор. После этого запустится интерфейс, содержащий инструменты для упрощения геометрии, собранные в одном рабочем пространстве, такие как: инструменты синхронного моделирования,

инструмент выделения срединной поверхности, инструменты объединения и разделения тел и граней и другие (рисунок 39).

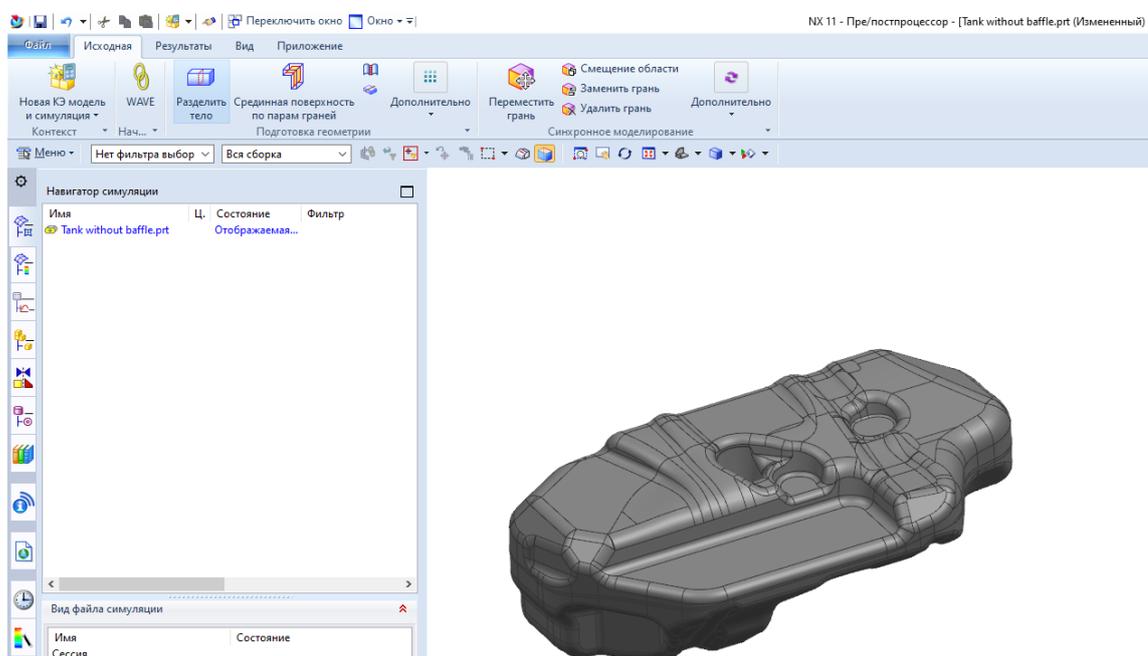


Рисунок 39 – Интерфейс, содержащий инструменты упрощения геометрии

В нашем случае упрощение геометрии уже было осуществлено на предыдущем шаге, в модуле «Моделирование», поэтому можно перейти к следующему этапу – непосредственно созданию сетки конечных элементов. Для этого необходимо выбрать раздел «Новая КЭ модель и симуляция».

В появившемся окне необходимо из CAD модели выбрать тела, необходимые для расчета. В случае, если 3D модель была ранее открыта, можно сразу приступить к выбору. Если нет – сперва указать местоположение требуемой модели нажатием кнопки «Открыть» в разделе «Деталь CAD». Для выбора только нужной геометрии удобнее всего пользоваться методом «Выбрать» в разделе «Тела», однако возможности модуля позволяют осуществлять выбор всех деталей, содержащихся в модели, только всех

видимых или же только определенных типов геометрии, предварительно настроив фильтр.

После подтверждения выбора геометрии, откроется окно выбора требуемого решателя. Можно задать требуемый решатель, если заранее известен вид планируемой симуляции, либо нажатием кнопки «Отмена» отклонить выбор решателя, задав его на следующем этапе. Поступим таким образом. Открывшееся окно раздела создания конечно-элементной сетки показано на рисунке 40.

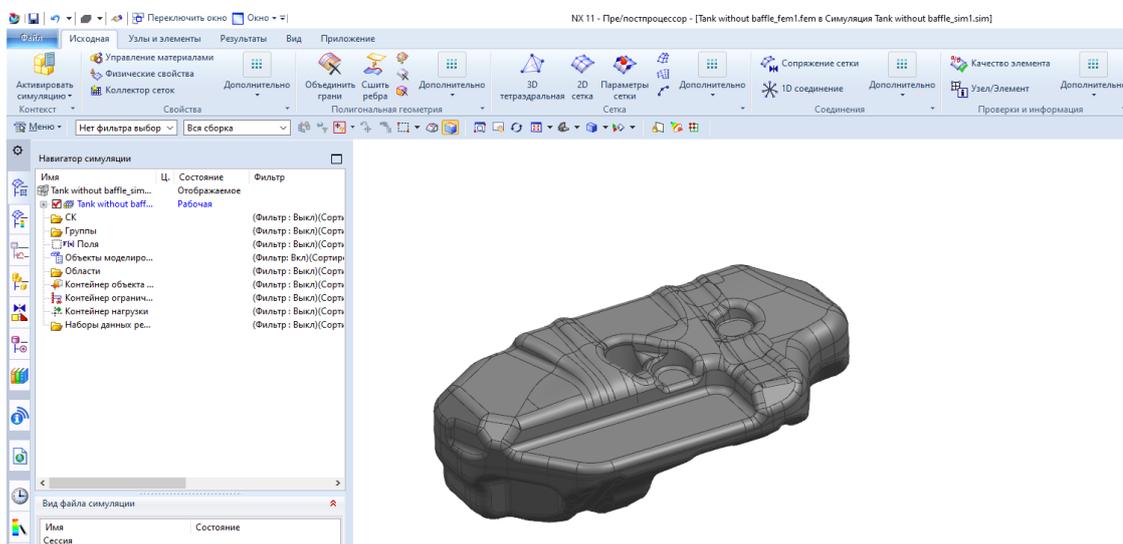


Рисунок 40 – Раздел создания конечно-элементной сетки

Следующим этапом необходимо непосредственно построить сетку. После нажатия кнопки «3D тетраэдральная», в появившемся окне выберем тело, тип сетки и размер элемента. Зададим тип сетки STETRA(4), ввиду того что для детали сложной пространственной формы крупного размера применение типа STETRA(10), способного более точно описать криволинейные поверхности, приведет кратно большему времени, затраченному на построение сетки, а также к необходимости использования

графической станции с существенно большими вычислительными мощностями. Учитывая также то, что в данной работе предусматривается проверка предлагаемого варианта конструкции в сравнении с имеющимся, применение типа сетки STETRA(10) не является целесообразным. Размер элемента может быть задан автоматически, путем выбора соответствующей функции. Зададим размеры конечных элементов исходя из того, что максимальный размер элемента не может превышать характерный минимальный геометрический размер исследуемого тела [14]. Остальные параметры оставим по умолчанию. После создания сетки её необходимо проверить на наличие ошибок при помощи функции «Качество элемента». Данная команда проверяет геометрическую форму конечных элементов. При наличии большого числа предупреждений относительно общего количества элементов по результатам проверки, рекомендуется перестроить сетку, изменяя размер элемента, настройки сетки и опции абстракции модели для достижения лучшего из возможных результатов проверок. Предупреждения о несоответствии некоторых элементов в большинстве случаев не являются критичными для проведения расчета, однако могут повлиять на качество и достоверность результата. На рисунке 41 показана конечно-элементная сетка, построенная на корпусе топливного бака.

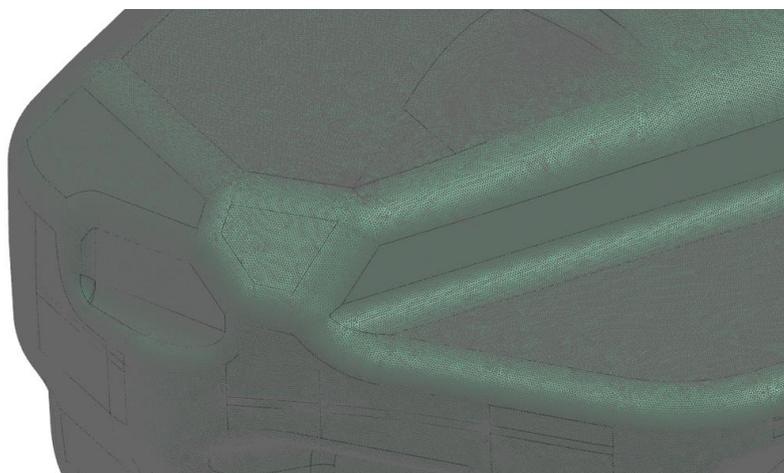


Рисунок 41 – Конечно-элементная сетка на корпусе топливного бака

3.4 Моделирование материала для конечно-элементной модели

Для выполнения анализа поведения конструкции на основе метода конечных элементов необходимо на этапе создания FEM-модели задать физико-механические свойства материалов. Сделать это можно либо заранее присвоив детали материал в модуле «Моделирование», либо в модуле «Расширенная симуляция», задав материал в коллекторе, содержащем конечно-элементную сетку. В библиотеке материалов NX содержится большое количество материалов, включая металлы, пластики и жидкости. В случае, если представленных материалов недостаточно, имеется возможность добавления в библиотеку самостоятельно созданного материала, взяв за основу уже имеющийся схожий материал или же создавая материал с нуля.

В рассматриваемом случае требуется создать марку полиэтилена высокой плотности (HDPE) с характеристиками специально разработанных для производства топливных баков марок. Для этого откроем библиотеку материалов (Меню → Инструменты → Материалы → Управление материалами), выберем максимально похожий материал (Polyethylene). Затем, нажав на него правой клавишей мышки, выберем пункт «Копировать». Откроется окно правки свойств материала, в котором на всех имеющихся вкладках необходимо задать основные свойства, указанные в спецификации производителя реального материала (таблица 2). Не указанные в спецификации параметры будут унаследованы от стандартного материала библиотеки материалов, взятого за основу (рисунок 42).

Таблица 2 – Основные свойства материала для расчёта

Свойство	Значение
Показатель текучести расплава	6.0 г/10 мин
Плотность	0.947 г/см ³
Предел текучести при растяжении	20 МПа
Прочность при разрыве	24 МПа
Относительное удлинение при разрыве	500 %
Модуль упругости при изгибе	800 МПа
Ударная вязкость по Шарпи	9.0 кДж/м ²
Стойкость к растрескиванию	1000 ч

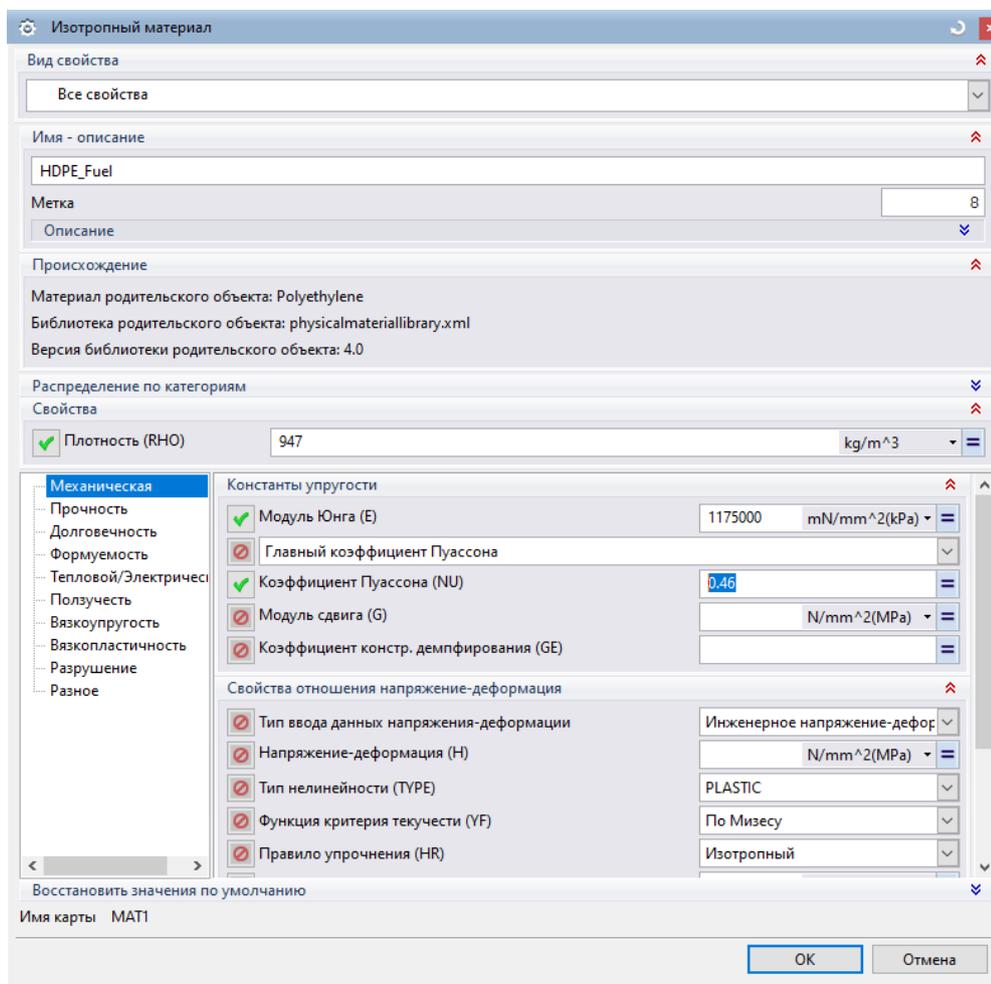


Рисунок 42 – Окно создания и редактирования материала

Созданный материал доступен во вкладке «Локальные материалы». При необходимости, созданный материал можно экспортировать (Меню → Инструменты → Материалы → Управление библиотекой материалов → Экспорт материалов в библиотеку (правой кнопкой мыши)) и использовать при расчетах в дальнейшем, перемещая *.xml–файл в другую папку или перенося на другую графическую станцию.

Затем созданный материал присвоим построенной ранее конечно-элементной модели корпуса топливного бака. Для этого в разделе «3D Коллекторы» правой кнопкой мыши нажмем на созданный по умолчанию коллектор Solid(1), содержащий в себе построенную сетку, и выберем пункт «Изменить» (рисунок 43). В появившемся окне необходимо выбрать иконку в форме гаечного ключа, в открывшемся окне выбрать материал в правой части строки «Материал», нажав расположенную справа иконку (рисунок 44). В открывшемся окне библиотеки материалов переключиться на вкладку «Локальные материалы», выбрать созданный и подтвердить, несколько раз последовательно нажав ОК в открытых ранее окнах.

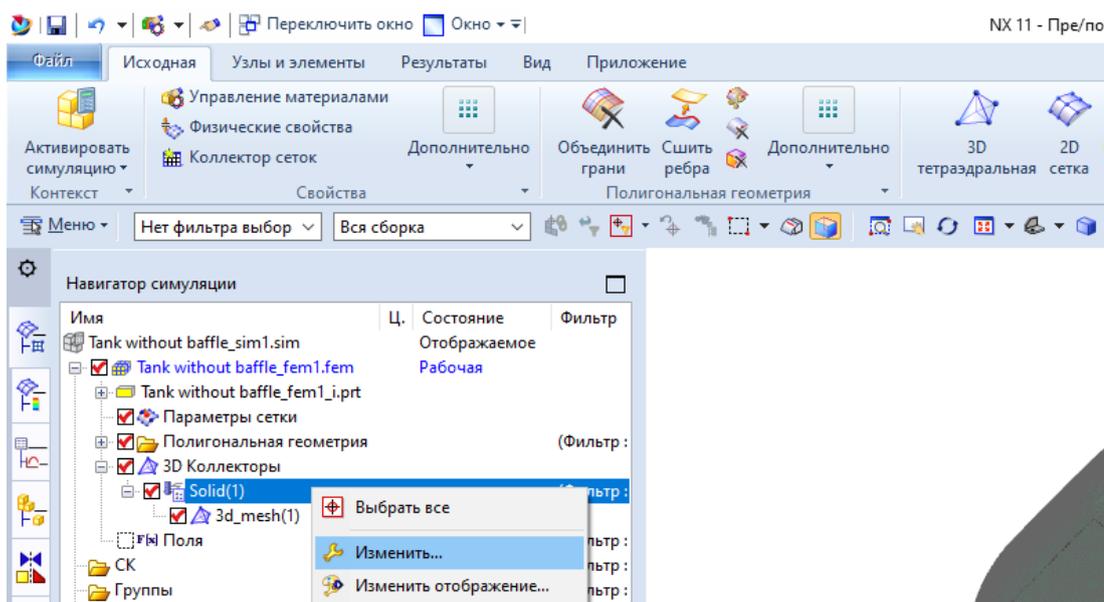


Рисунок 43 – Присвоение материала конечно-элементной сетке

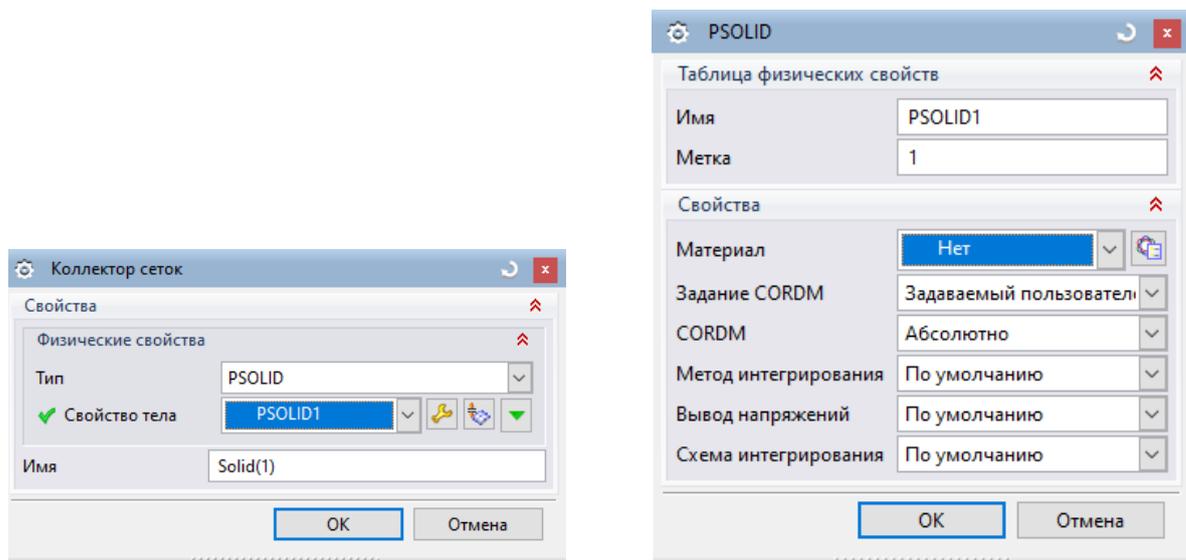


Рисунок 44 – Присвоение материала конечно–элементной сетке

После задания перечисленных выше параметров, процесс создания конечно-элементной модели можно считать завершенным. Можно переходить к созданию расчётной конечно-элементной модели.

3.5 Создание расчётной модели для симуляции избыточного давления в баке

Испытание избыточным давлением является базовым испытанием, которому подвергаются все произведенные топливные баки. В случае проведения испытания на производственной линии предприятия, давление подаётся внутрь бака в сборе через один из патрубков на короткий период (15-30 секунд). Целью является определение герметичности топливного бака, погруженного в ёмкость с водой. В несколько отличном виде данный тест включен в методики испытаний согласно ГОСТ Р 41.34–2001 [6], основанного на Правиле ЕЭК ООН № 34 (Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении

предотвращения опасности возникновения пожара) [23]. Удовлетворительным является результат, при котором не происходит ни разрыва корпуса, ни утечки, однако допускаются остаточные деформации бака.

Задачей воспроизведения испытания при помощи симуляции является определение и сравнение деформаций двух вариантов корпусов топливных баков, а также напряжений, возникающих в них вследствие применения избыточного давления к стенкам корпуса топливного бака изнутри. Схема приложения нагрузок показана на рисунке 45.

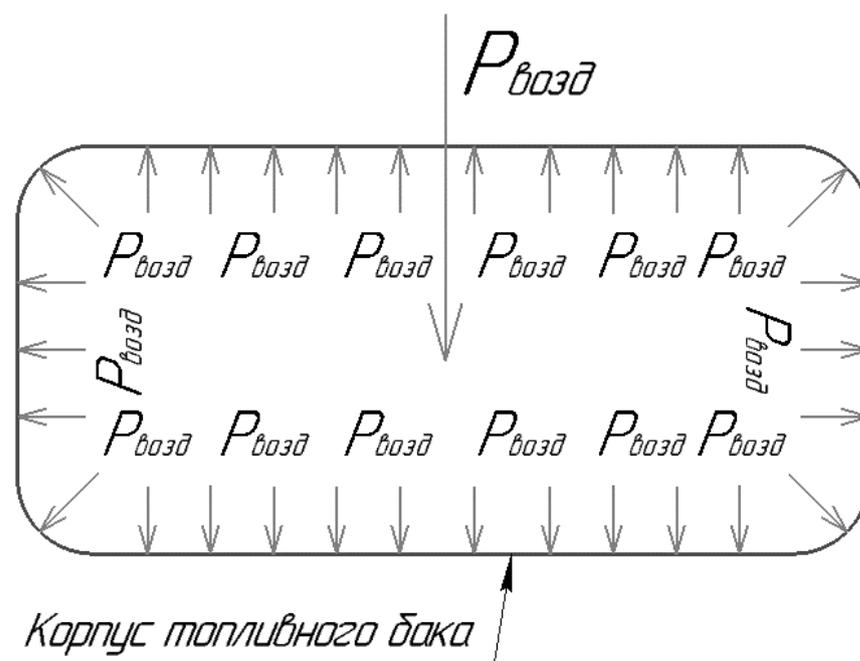


Рисунок 45 – Схема приложения нагрузок при испытании избыточным давлением

Для перехода к созданию расчетной модели требуется войти в режим симуляции, нажав в левом верхнем углу кнопку «Активировать симуляцию» [9]. Если ранее окно выбора требуемого решателя было отклонено, необходимо выбрать самую верхнюю строку (.sim-файл) в дереве

«Навигатора симуляции» и кликнуть по ней правой кнопкой мыши. Среди появившихся вариантов выбрать «Новое решение». Затем последовательно выбрать решатель, тип анализа и тип решения, в зависимости от вида симулируемого испытания. В рассматриваемом испытании параметры, выставленные по умолчанию (тип анализа – структурный, тип решения – SOL 101 [4]), удовлетворяют симуляции. Окно выбора параметров решателя показано на рисунке 46.

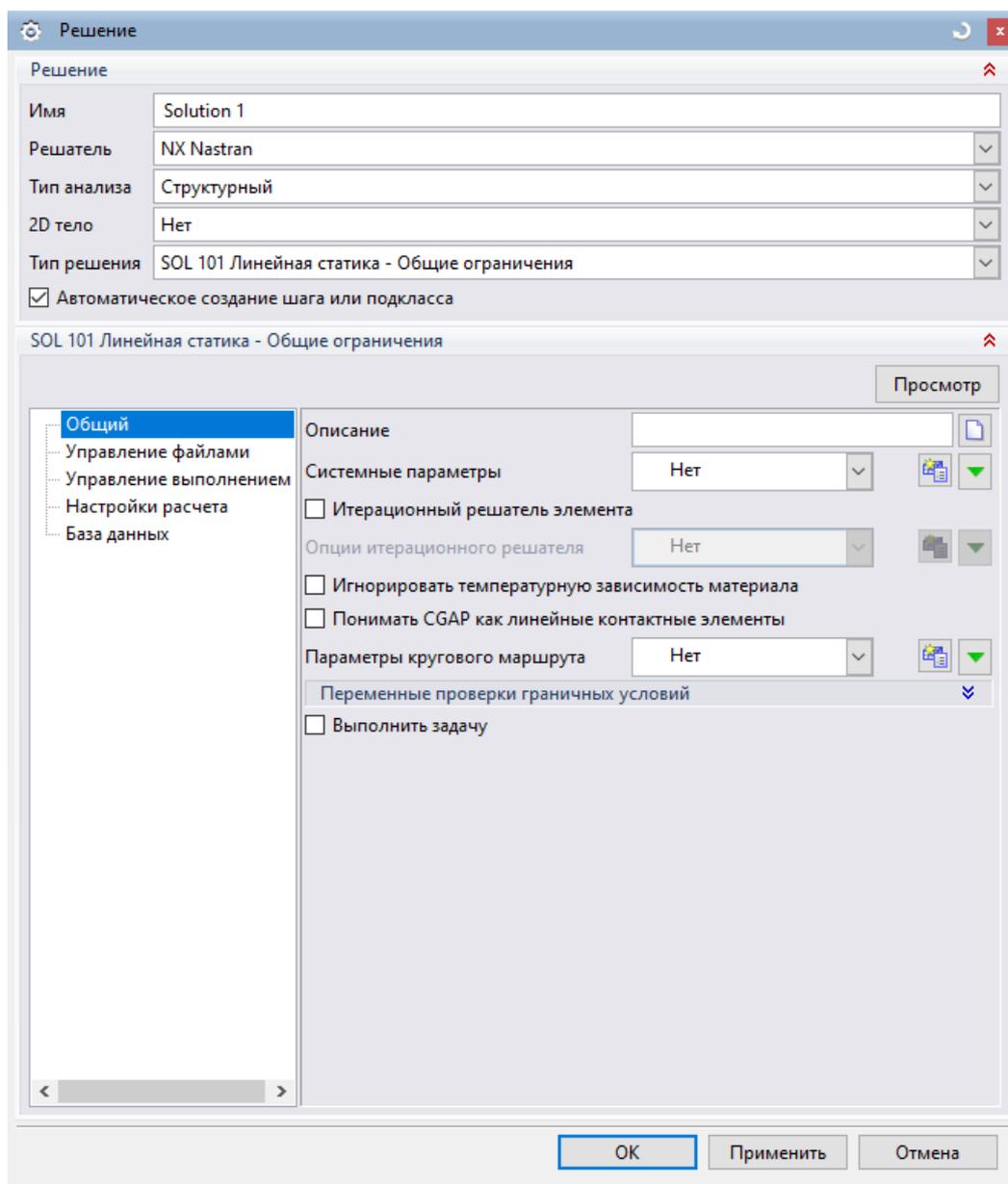


Рисунок 46 – Окно выбора параметров решателя

После подтверждения выбора параметров, в дереве «Навигатора симуляции» появится ветвь с наименованием Solution 1, заданным по умолчанию. В данной ветке непосредственно задаются ограничения и нагрузки, необходимые для создания расчетной модели. Для симуляции избыточного давления внутри корпуса бака, зададим следующие нагрузки:

- Сила тяжести (Навигатор симуляции → Solution 1 → Нагрузки (правая кнопка мыши) → Новая нагрузка → Сила тяжести). Данная нагрузка применяется ко всей расчетной модели, выбор тел или зон применения нагрузки не требуется. Значение нагрузки является константой, в большинстве случаев не требует корректировки. В качестве вектора необходимо указать направление по оси $-Z$ (рисунок 47);
- Давление (Навигатор симуляции → Solution 1 → Нагрузки (правая кнопка мыши) → Новая нагрузка → Распределение давления). Необходимо применить данный вид нагрузки только ко внутренним областям корпуса топливного бака, что невозможно выполнить без применения операции сечения ввиду того что в процессе упрощения модели для расчета были закрыты все отверстия, имеющиеся в корпусе бака. Для выполнения данной операции необходимо вызвать окно задания параметров давления и, не закрывая его, вызвать инструмент «Изменить сечение» (Меню → Вид → Сечение → Изменить сечение, либо нажав сочетание горячих клавиш Ctrl + H). В появившемся окне необходимо рассечь бак, перемещая манипулятор в виде системы координат по оси X, Y или Z таким образом, чтобы стали видима внутренняя поверхность бака. После подтвердить выбор нажатием кнопки «ОК». Далее в фильтре выбора выставить «Касательные грани» и указать одну из внутренних граней корпуса бака. Убедившись, что произошел выбор всех граней, задать значение давления. В рассматриваемом случае задано 30 кПа, что является

широко используемым значением при испытаниях реальных топливных баков (рисунок 48).

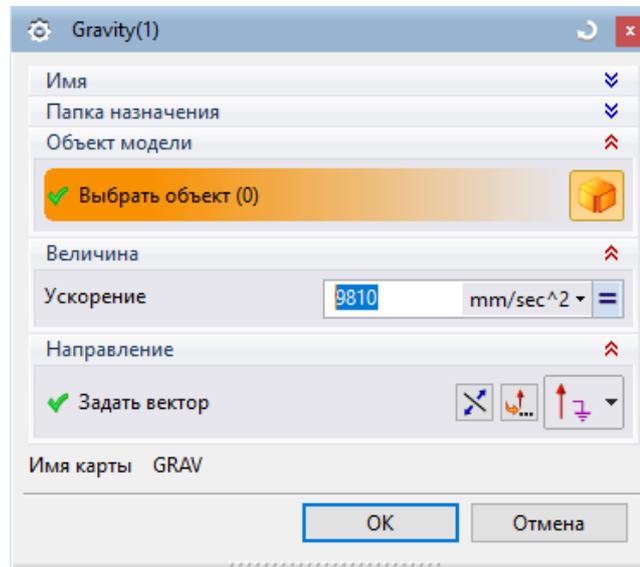


Рисунок 47 – Окно задания параметров силы тяжести

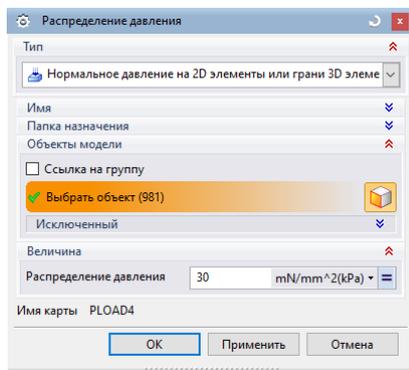


Рисунок 48 – Окно задания параметров и зоны применения давления

После задания нагрузок необходимо также определить ограничения. В рассматриваемом случае зададим фиксированными поверхности корпуса топливного бака, спроектированные для закрепления топливного бака к кузову автомобиля посредством крепежных лент (Навигатор симуляции → Solution 1 → Ограничения (правая кнопка мыши) → Новое ограничение → Фиксированное ограничение). В появившемся окне необходимо указать поверхности ограничения (отмечено красным цветом на рисунке 49). Итоговая расчетная модель показана на рисунке 50. Выполним аналогичные действия для другого варианта конструкции топливного бака.

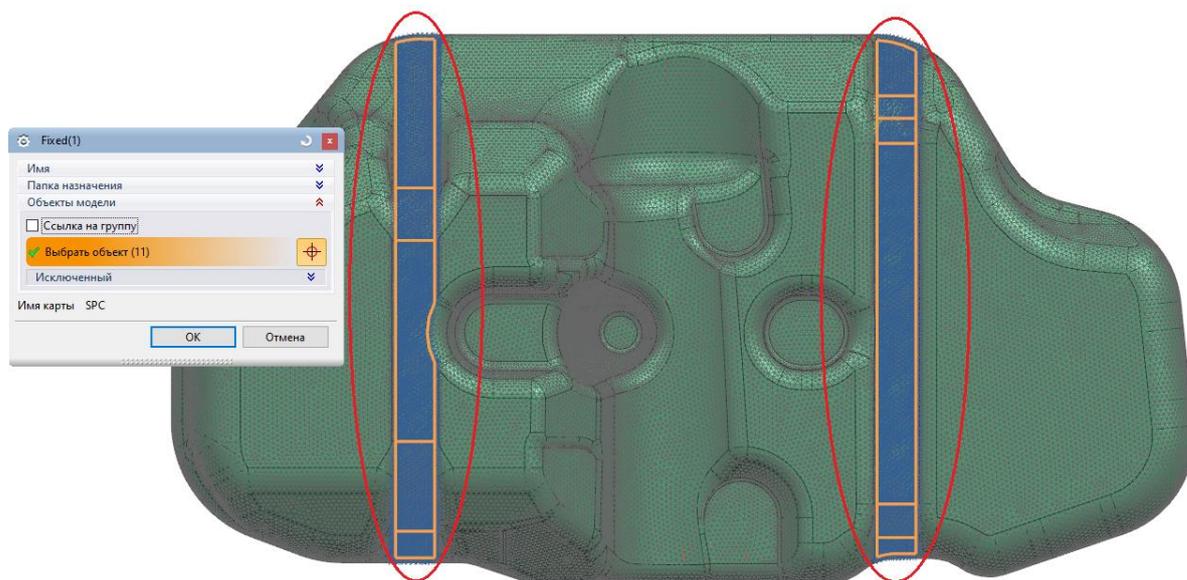


Рисунок 49 – Окно задания фиксированного ограничения

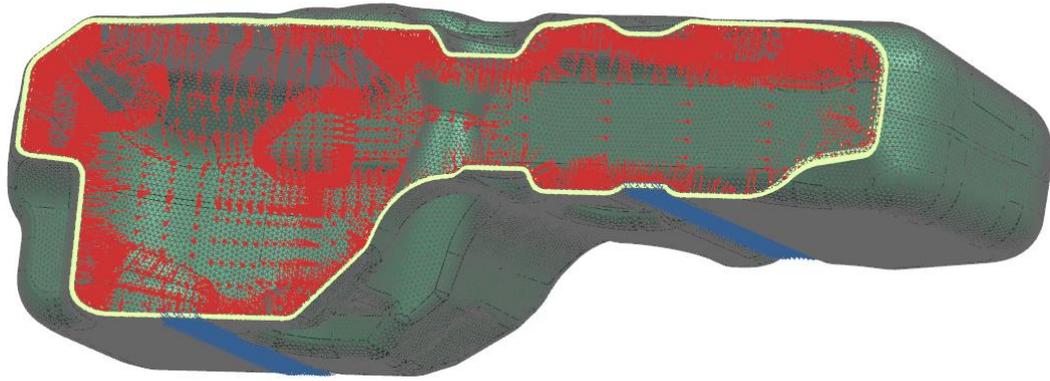


Рисунок 50 – Расчетная модель корпуса топливного бака для симуляции избыточного давления в баке

Следующим шагом необходимо запустить процесс расчета. Для этого необходимо в дереве Навигатора симуляции правой кнопкой мыши нажать на Solution 1, выбрав вариант «Решить». В появившемся окне нажать «ОК». После начала расчета появятся несколько дополнительных окон, содержащих информацию о возможных ошибках и предупреждениях, а также окно решателя (рисунок 51) [16].

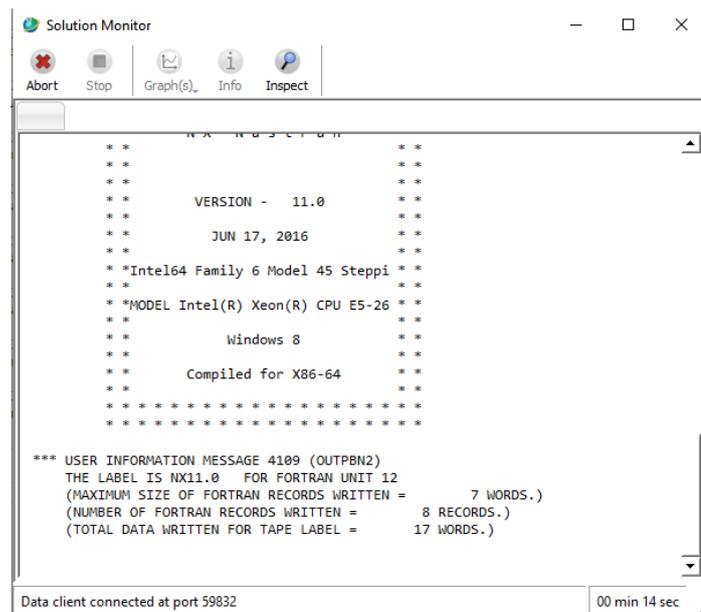


Рисунок 51 – Окно решателя

Время расчета зависит от вычислительных мощностей конкретной графической станции, количества, размера и типа конечных элементов, а также количества и вида заданных ограничений и нагрузок. Об окончании расчета свидетельствует соответствующее сообщение в информационном окне. По окончании расчета, для анализа результатов необходимо перейти в окно постпроцессора (Навигатор симуляции → Solution 1 → Результаты → Structural (двойной клик левой кнопкой мыши)).

3.6 Создание расчетной модели для симуляции гидравлического испытания бака

Гидравлическое испытание включено в методики испытаний согласно ГОСТ Р 41.34–2001 [6], основанного на Правиле ЕЭК ООН № 34 (Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении предотвращения опасности возникновения пожара [23]). Бак заполняется водой и подвергается воздействию избыточного давления (не менее 30 кПа). Удовлетворительным является результат, при котором не происходит ни разрыва корпуса, ни утечки, однако допускаются остаточные деформации бака.

Задачей воспроизведения испытания при помощи симуляции является определение и сравнение деформаций двух вариантов корпусов топливных баков, а также напряжений, возникающих в них вследствие применения избыточного давления жидкости к стенкам корпуса топливного бака изнутри. Схема приложения нагрузок показана на рисунке 52.

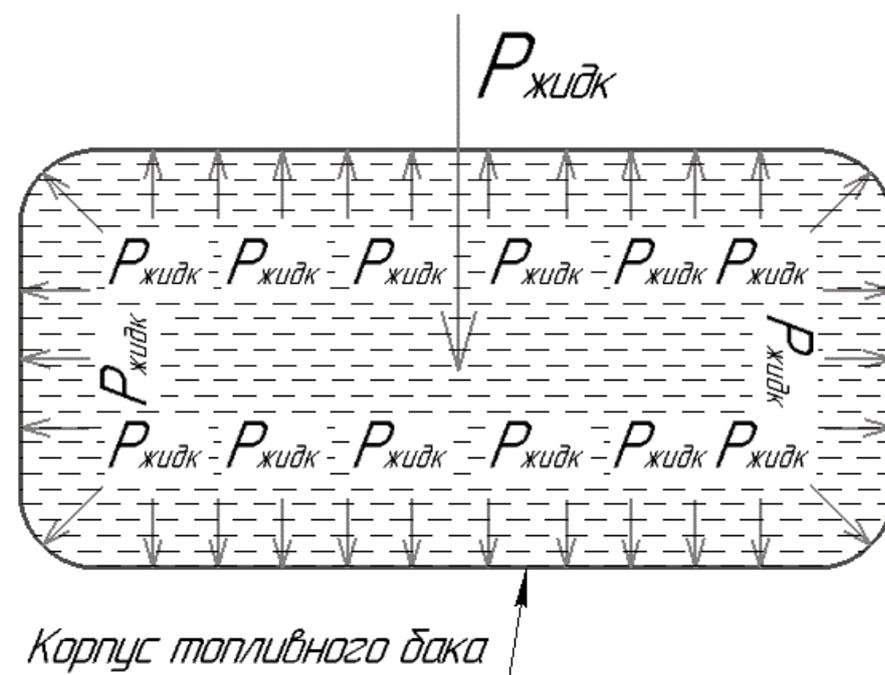


Рисунок 52 – Схема приложения нагрузок при гидравлическом испытании

Параметры решателя задаются аналогично п.5. Приложенные нагрузки:

- Сила тяжести. Порядок применения и параметры задаются аналогично описанным в п.3.5;
- Давление жидкости (Навигатор симуляции → Solution 1 → Нагрузки (правая кнопка мыши) → Новая нагрузка → Гидростатическое давление). Необходимо применить данный вид нагрузки только ко внутренним областям корпуса топливного бака, порядок выбора граней при помощи сечения описан в п.3.5. Также необходимо указать вектор применения давления и точку приложения. Укажем идентичную точку для обоих вариантов конструкции, в нижней зоне топливного бака, что соответствует зоне, использующейся в реальном испытании. Плотность жидкости оставим по умолчанию (1000 кг/м^3), как и параметр гравитационной постоянной ($9,81 \text{ м/с}^2$). Давление, также, 30 кПа (рисунок 53).

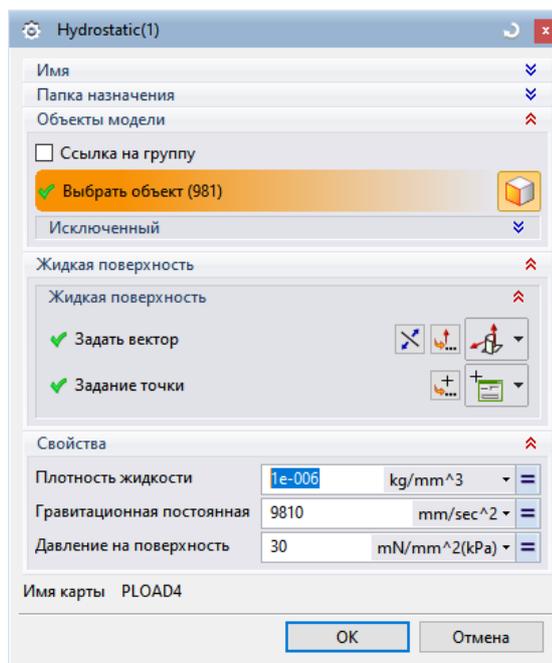


Рисунок 53 – Окно задания параметров гидростатического давления

Зададим фиксированными поверхности корпуса топливного бака, спроектированные для закрепления топливного бака к кузову автомобиля посредством крепежных лент (описано в п.3.5). Итоговая расчетная модель показана на рисунке 54. Выполним аналогичные действия для другого варианта конструкции топливного бака. Запуск расчета идентичен описанному в п.3.5.

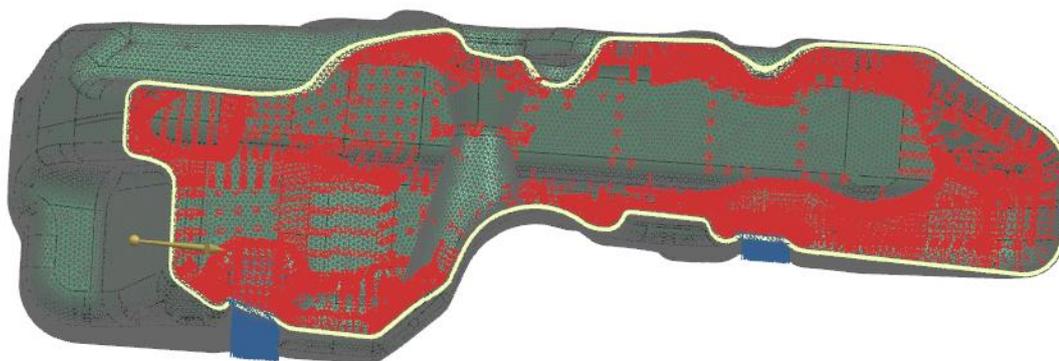


Рисунок 54 – Расчетная модель корпуса топливного бака для симуляции гидравлического испытания

3.7 Создание расчетной модели для симуляции испытания на провисание бака

Определение величины провисания дна топливного бака под длительным воздействием хранящегося в баке топлива является одним из основных при проверке конструкций проектируемых топливных баков. В случае испытания физических образцов, бак заполняется топливом и выдерживается определенное время, после чего замеряются деформации дна и сравниваются с исходными значениями, либо же в бак попеременно подается положительное и отрицательное давление, после чего деформации поверхности бака сравниваются с допустимыми значениями.

Задачей воспроизведения испытания при помощи симуляции является определение и сравнение деформаций поверхностей дна двух вариантов корпусов топливных баков, а также напряжений, возникающих в них вследствие воздействия нагрузки, имитирующей вес заправляемого объема топлива (50 литров). Схема приложения нагрузок показана на рисунке 55.

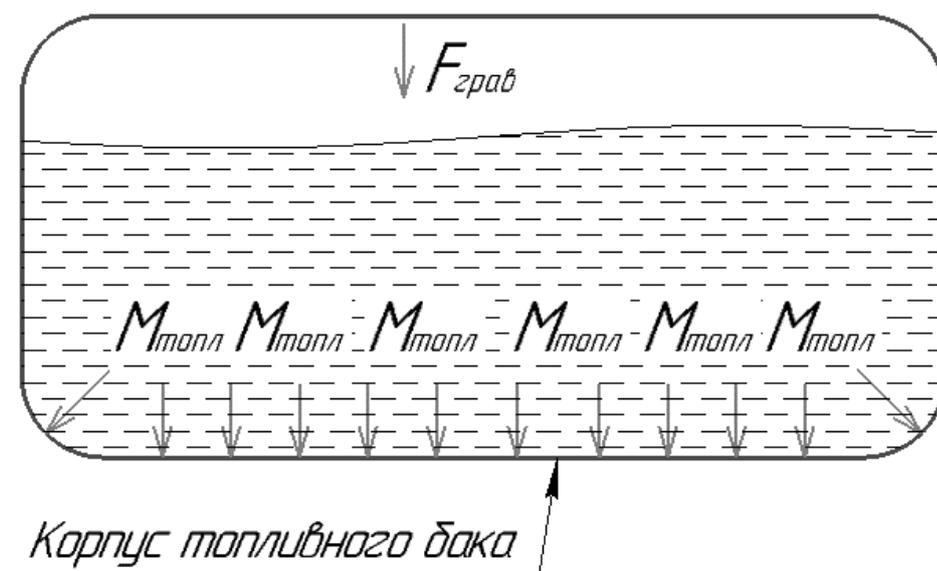


Рисунок 55 – Схема приложения нагрузок при испытании на провисание

Параметры решателя задаются аналогично п.3.5. Приложенные нагрузки:

- Сила тяжести. Порядок применения и параметры аналогично описанным в п.3.5;
- Сила (Навигатор симуляции → Solution 1 → Нагрузки (правая кнопка мыши) → Новая нагрузка → Сила). Сила, действующая на дно топливного бака, определяется по формуле силы тяжести: $F = m \times g$, где масса равна номинальному объему топливного бака (50 литров \approx 50 килограмм), $g = 9.8$ Н/кг и равна 490 Н. Задается направление приложения силы по оси $-Z$ (рисунок 56). В качестве поверхностей, к которым приложена сила, выбраны все поверхности дна и переходные поверхности корпуса топливного бака. Для их выбора потребуются инструмент «Изменить сечение».

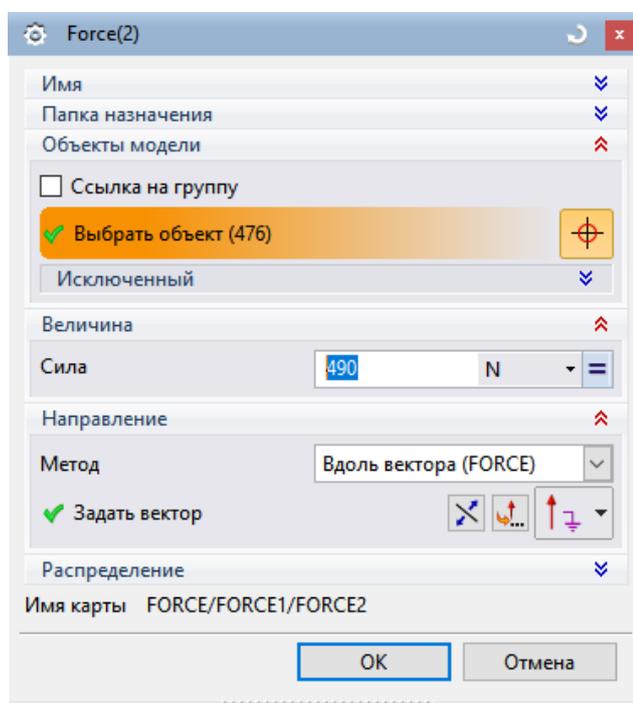


Рисунок 56 – Окно задания параметров испытания на провисание

Зададим фиксированными поверхности корпуса топливного бака, спроектированные для закрепления топливного бака к кузову автомобиля посредством крепежных лент (описано в п.3.5). Итоговая расчетная модель показана на рисунке 57. Выполним аналогичные действия для другого варианта конструкции топливного бака. Запуск расчета идентичен описанному в п.3.5.

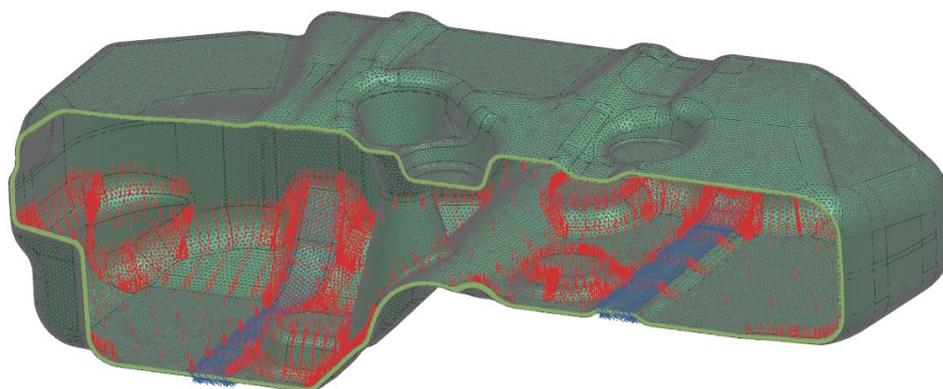


Рисунок 57 – Расчетная модель корпуса топливного бака для симуляции испытания на провисание

3.8 Создание расчетной модели для симуляции испытания на стойкость бака к воздействию температур

Температурные тесты широко распространены при проверке топливных баков. Критерием оценки результатов является герметичность реального образца, при учете того, что постоянные или временные деформации допускаются в определённом пределе.

В рассматриваемом случае можно косвенно оценить и сравнить жёсткость конструкции, применив как положительные (+80 °C), так и отрицательные температуры (-40 °C) и сопоставив деформации, возникающие в двух рассматриваемых решениях.

Процесс определения симуляции несколько отличается от описанных в п.3.5 – 3.7. После активации симуляции и выбора нового решения в окне выбора параметров решателя следует изменить тип анализа со структурного на тепловой, в графе «Тип решения» задать «SOL 153 Нелинейная теплопередача в стационарном режиме», подтвердить нажатием «ОК».

Для просчета распределения температуры по исследуемому объекту следует задать одно ограничение (Навигатор симуляции → Solution 1 → Ограничения (правая кнопка мыши) → Новое ограничение → Тепловое ограничение). В появившемся окне выбрать наружные поверхности корпуса бака и задать требуемую температуру. После чего запустить данный расчет на решение (описано в п.3.5). По результатам расчета в папке, содержащей файлы расчета появится файл с расширением *.or2 и припиской «Solution 1» в имени файла. Данный файл потребуется на следующем шаге.

После расчета температурного распределения можно провести структурный анализ, используя полученные результаты. Для этого в навигаторе симуляции следует создать новое решение (имя по умолчанию – Solution 2, тип анализа – структурный, тип решения – SOL 101). Задать следующие нагрузки:

- Сила тяжести. Порядок применения и параметры аналогично описанным в п.3.5;
- Температурная нагрузка. Для этого выполнить: Навигатор симуляции → Температуры (правая кнопка мыши) → Создать набор нагрузок → Температурный набор. В выпадающем списке «Тип» выбрать «Температурная нагрузка». Оставив пустым поле «Температура по умолчанию» нажать «ОК». В навигаторе симуляции появится строка в выпадающем списке раздела «Температуры». Нажав правой кнопкой мыши на неё, выбрать опцию Создать → Распределение температур. В выпадающем списке «Тип» выбрать «Температура –

постоянная из внешних данных», в графе «Величина» нажать иконку в виде папки и указать путь к файлу результатов с расширением *.op2. Подтвердить нажатием «ОК».

Зададим фиксированными поверхности корпуса топливного бака, спроектированные для закрепления топливного бака к кузову автомобиля посредством крепежных лент (описано в п.3.5). Итоговая расчетная модель показана на рисунке 58. Выполним аналогичные действия для другого варианта конструкции топливного бака. Запуск расчета идентичен описанному в п.3.5.

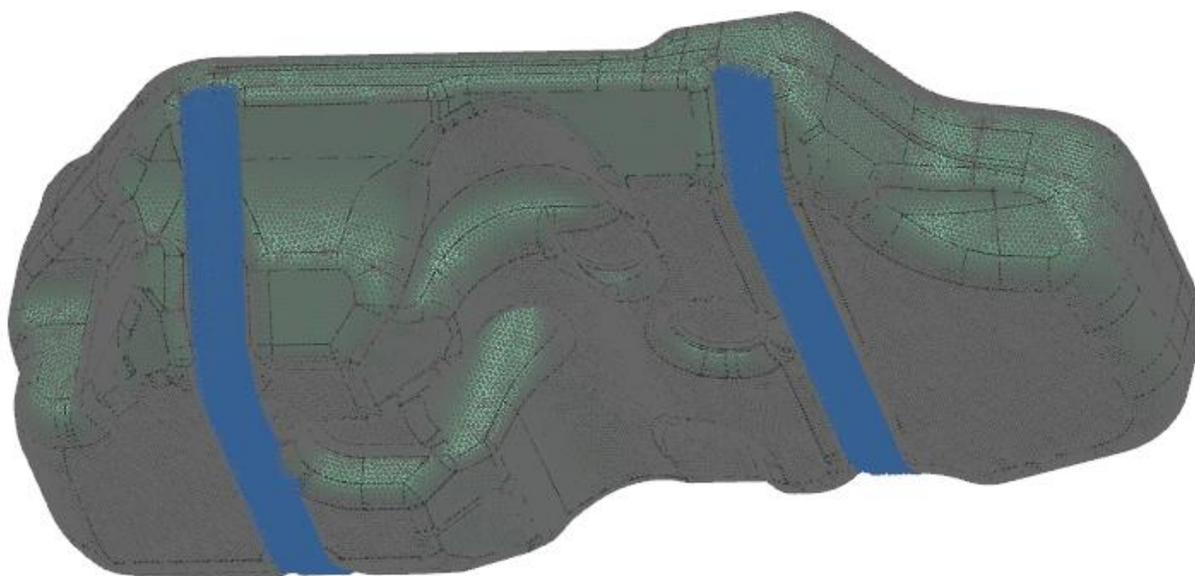


Рисунок 58 – Расчетная модель корпуса топливного бака для симуляции испытания на стойкость к воздействию температур

Следует повторить описанные выше действия для расчёта с применением отрицательных температур для двух вариантов конструкций корпуса топливного бака.

3.9 Создание расчетной модели для симуляции испытания на ударопрочность бака (при свободном падении)

Тесты на определение способности топливных баков противостоять различным видам ударных нагрузок являются одними из самых важных при проверке конструкции и могут проводиться как в составе автомобиля (удар о барьер / удар сзади) [6] [19] [23], так и на уровне самого топливного бака [20] [28]. Основным критерием приёмки результатов физических испытаний является отсутствие утечки из топливного бака после ударной нагрузки.

Задачей воспроизведения испытания при помощи симуляции является определение и сравнение величины максимального напряжения и зон его возникновения в двух вариантах корпусов топливных баков при моделировании свободного падения бака с шестиметровой высоты. Схема испытания показана на рисунке 59.

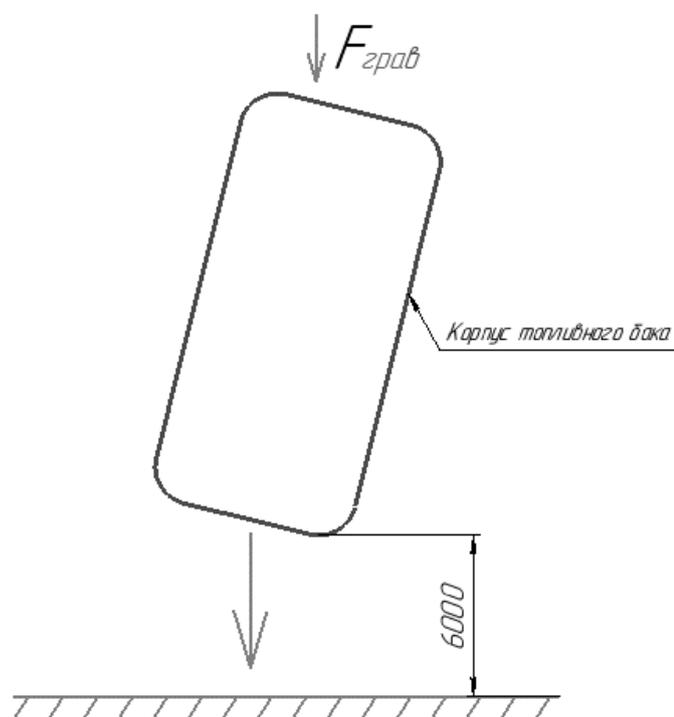


Рисунок 59 – Схема проведения испытания на ударопрочность бака при свободном падении с высоты

Процесс определения симуляции несколько отличается от описанных в п.3.5 – 3.7. После активации симуляции и выбора нового решения в окне выбора параметров решателя следует в графе «Тип решения» задать решатель «SOL 402 Многошаговая нелинейная кинематика», подтвердить нажатием «ОК». Приложенные нагрузки и ограничения:

- Кратковременные начальные условия. Необходимо указать начальную скорость в направлении DOF3 (ось Z) с отрицательным значением. Для тела, падающего с высоты шести метров, скорость составит 10,848 м/с;
- Контакт поверхности с поверхностью. Необходимо задать контакт между поверхностями заблаговременно спозиционированного топливного бака (в модуле «Моделирование») и заранее заготовленной поверхностью, имитирующей пол, задавая области контакта в полях «Исходная область» и «Целевая область». Верное задание контакта поверхностей является ключевым моментом при проведении подобного вида расчётов.

Зададим полностью фиксированной поверхность, имитирующую пол. Итоговая расчетная модель показана на рисунке 60. Выполним аналогичные действия для другого варианта конструкции топливного бака. Запуск расчета идентичен описанному в п.3.5.

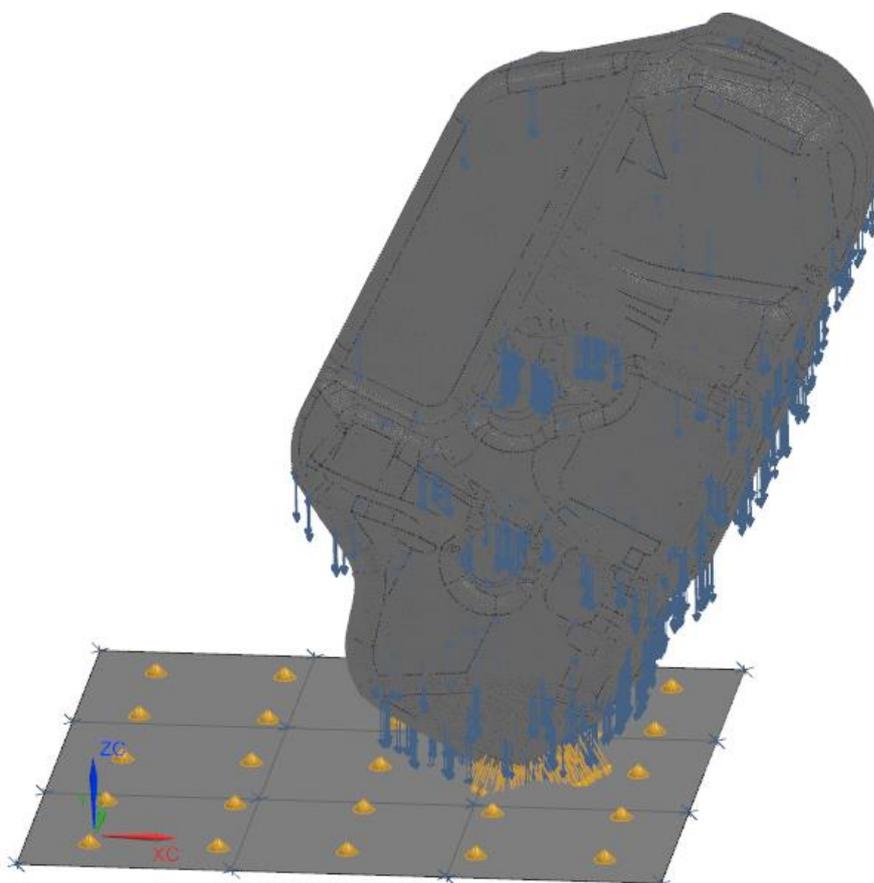


Рисунок 60 – Расчетная модель корпуса топливного бака для симуляции испытания на ударпрочность бака при свободном падении с высоты

3.10 Отображение и просмотр результатов в окне постпроцессора

После завершения расчета и перехода к инструментам интерфейса постпроцессора можно просматривать необходимые для анализа результаты, имеющиеся в навигаторе постпроцессора (в случае структурного анализа – см. рисунок 61).

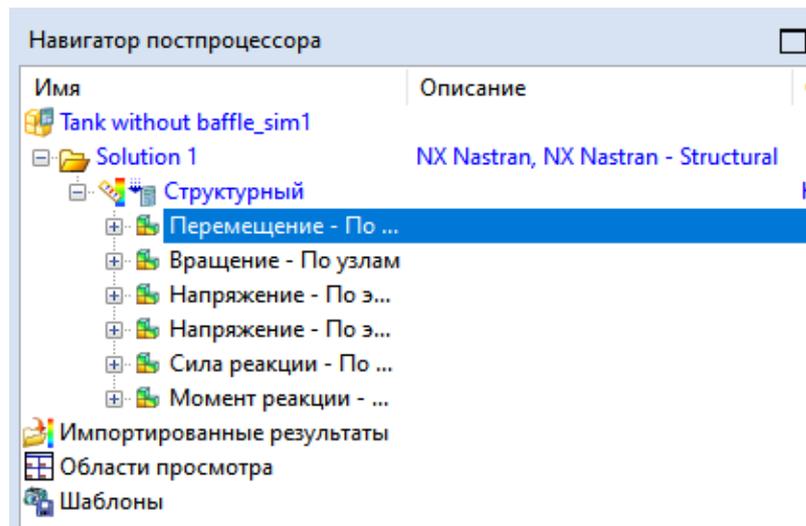


Рисунок 61 – Дерево навигатора постпроцессора, структурный анализ

Окно постпроцессора имеет широкие возможности по настройке отображения результатов, замеру значений, анимации симуляции, построению графиков и др. При анализе результатов также доступна возможность применения сечений, для большей визуализации. Окно постпроцессора в общем виде представлено на рисунке 62.

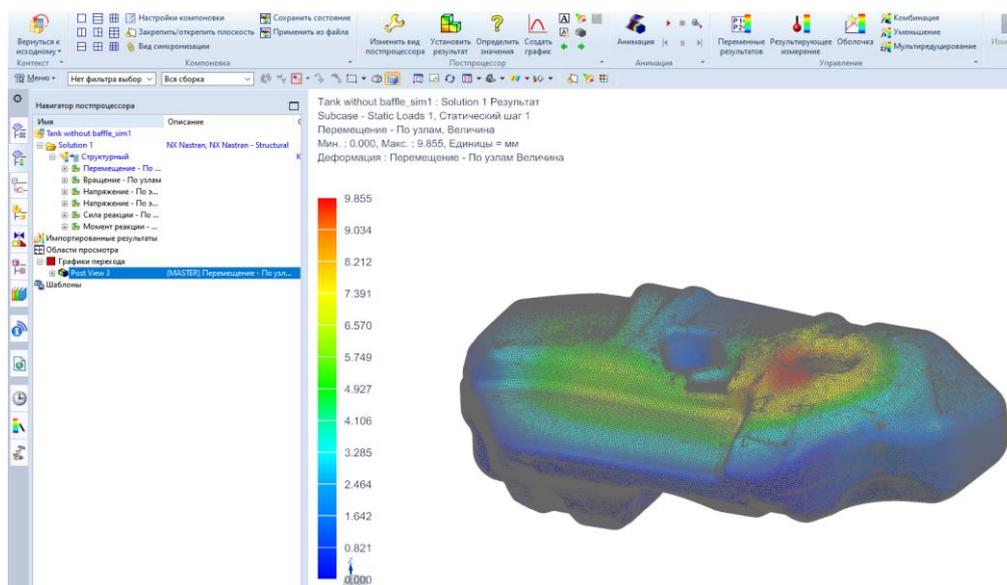


Рисунок 62 – Окно постпроцессора

Рассмотрим более подробно некоторые из представленных в модуле «NX Расширенная симуляция» инструментов.

- «Изменить вид постпроцессора». Мощный инструмент, позволяющий в широком объеме настраивать визуализацию результатов, устанавливать граничные пределы результатов, включить отображение недеформированной детали, увеличить или уменьшить для наглядности степень реальной деформации детали и многое другое. Окно инструмента показано на рисунке 63;
- «Определить значения». Позволяет произвести замер значения того или иного параметра в любой требуемой точке модели. Окно инструмента показано на рисунке 64;
- «Анимация». Позволяет анимировать отображение результатов, существенно упрощая восприятие возникающих смещений и деформаций модели. Имеет возможность экспорта анимации результатов в GIF-файл. Окно инструмента показано на рисунке 65.

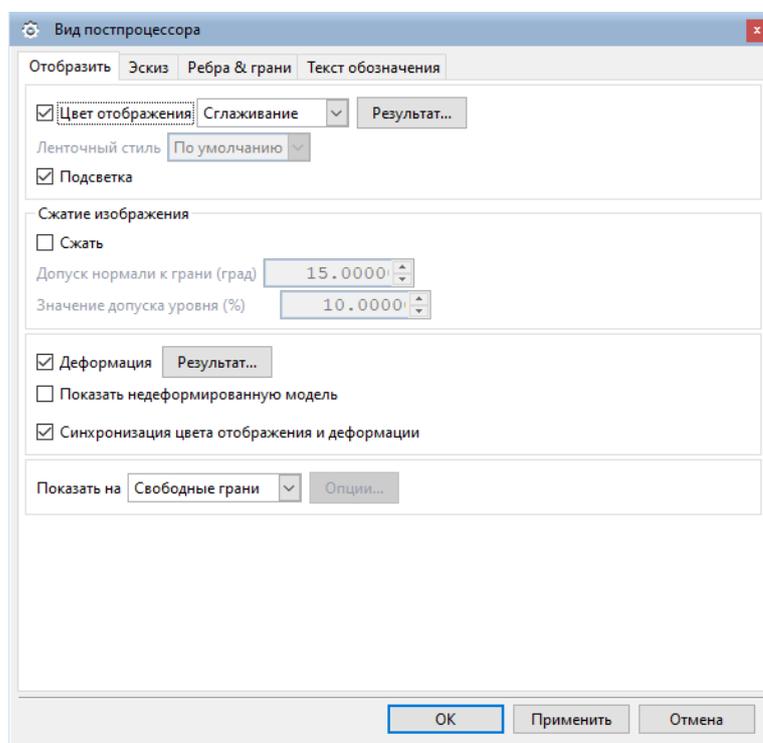


Рисунок 63 – Окно инструмента «Изменить вид постпроцессора»

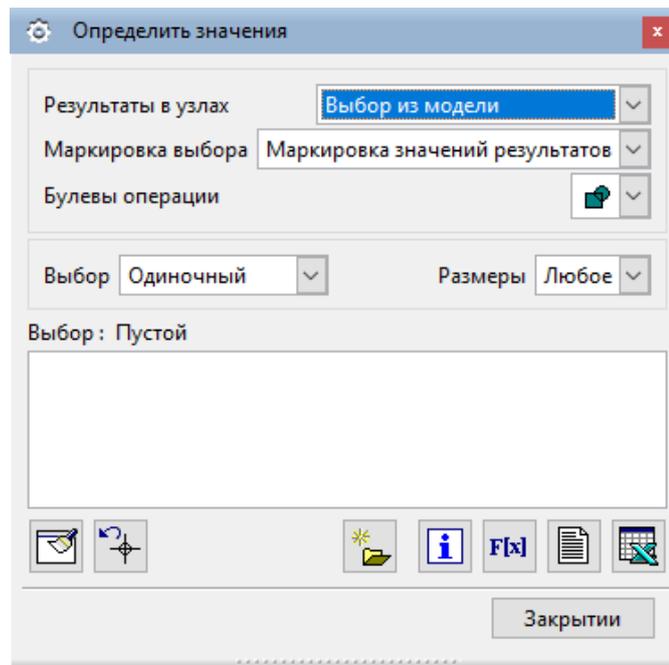


Рисунок 64 – Окно инструмента «Определить значения»

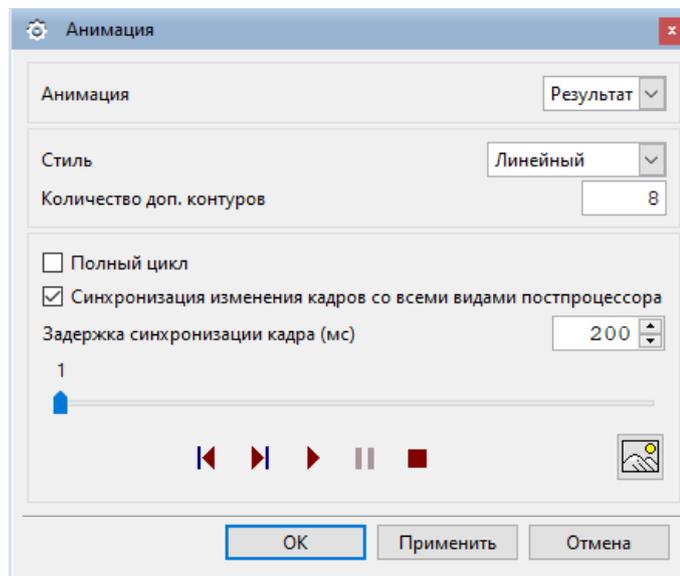


Рисунок 65 – Окно инструмента «Анимация»

В постпроцессоре модуля «NX Расширенная симуляция» также заложен функционал автоматической генерации отчетов на основании полученных результатов.

3.11 Анализ результатов тестов инженерного моделирования топливного бака

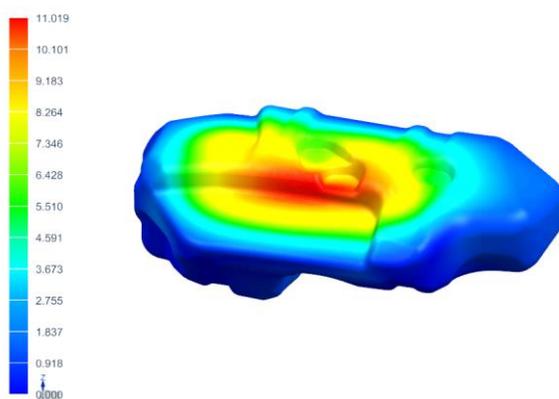
В данном разделе рассматриваются полученные по итогам расчетов результаты и проводится их сравнительный анализ.

Результаты испытания избыточным давлением сведены в таблицу 3, визуализация результатов приведена на рисунках 66-69.

Таблица 3 – Результаты испытания избыточным давлением

Испытание избыточным давлением			
Вариант с перегородкой		Вариант без перегородки	
Перемещение (max, мм)	11,02	Перемещение (max, мм)	9,86
Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	63,31	Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	20,44

Tank with baffle, sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0,000, Макс. : 11,019, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Tank with baffle, sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0,000, Макс. : 11,019, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

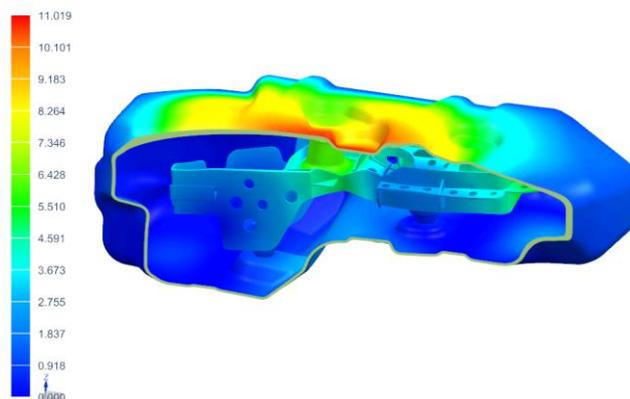


Рисунок 66 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант с перегородкой), возникающих при испытании избыточным давлением

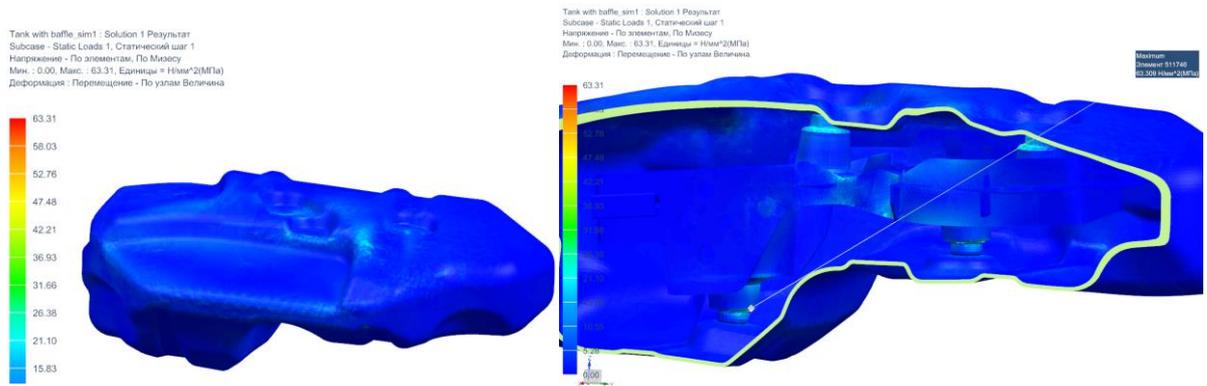


Рисунок 67 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант с перегородкой) при испытании избыточным давлением

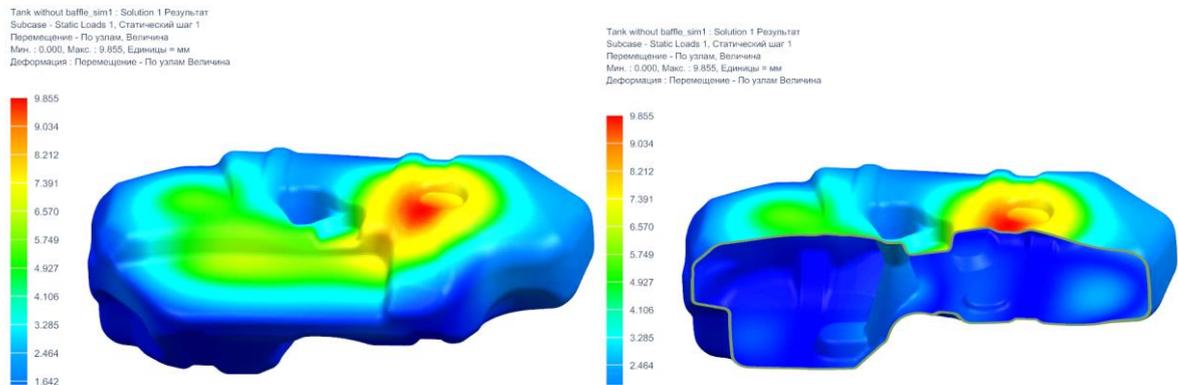


Рисунок 68 – Визуализация деформации корпуса топливного бака (вариант без перегородки), возникающих при испытании избыточным давлением

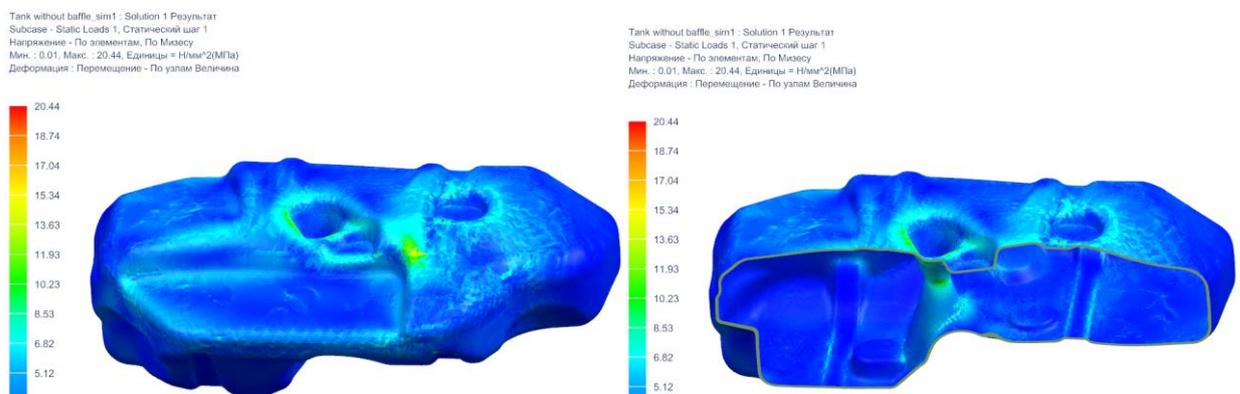


Рисунок 69 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант без перегородки) при испытании избыточным давлением

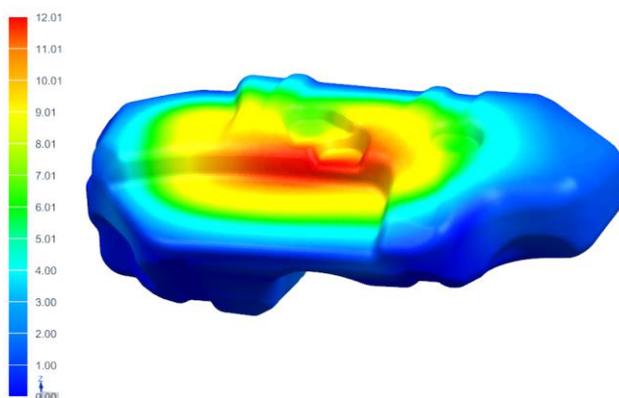
Вывод: вариант конструкции корпуса топливного бака без перегородки показал лучшие результаты как по максимальной деформации геометрии, так и по возникающим напряжениям. В случае варианта с перегородкой максимальное напряжение (63,31 МПа) возникает в зоне впавления перегородки в тело корпуса бака, и свидетельствует о сломе перегородки (предел прочности расчетного материала равен 24 МПа).

Результаты гидравлического испытания сведены в таблицу 4, визуализация результатов приведена на рисунках 70-73.

Таблица 4 – Результаты гидравлического испытания

Гидравлическое испытание			
Вариант с перегородкой		Вариант без перегородки	
Перемещение (max, мм)	12,01	Перемещение (max, мм)	11,34
Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	69,38	Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	23,78

Tank with baffle_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.00, Макс. : 12.01, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Tank with baffle_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.00, Макс. : 12.01, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

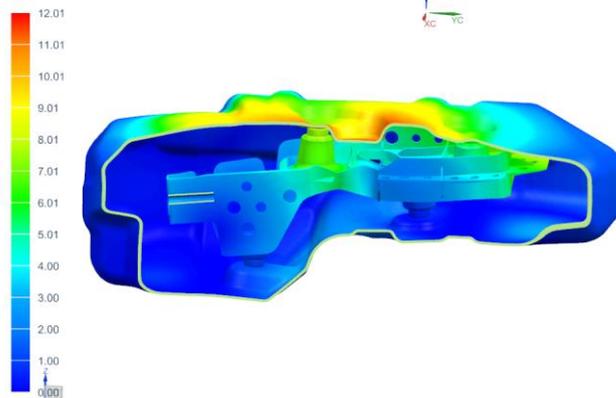


Рисунок 70 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант с перегородкой), возникающих при гидравлическом испытании

Tank with baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Массе
 Мин. : 0.00, Макс. : 69.38, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина



Tank with baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Массе
 Мин. : 0.00, Макс. : 69.38, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина

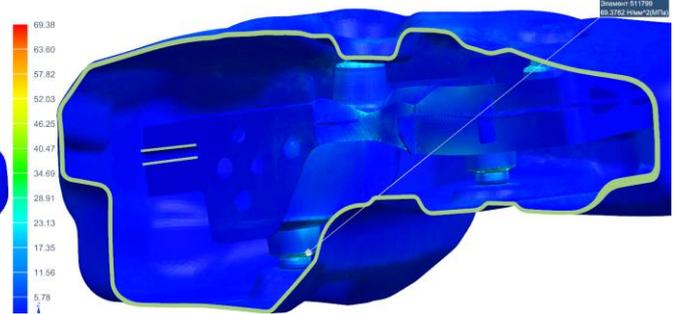
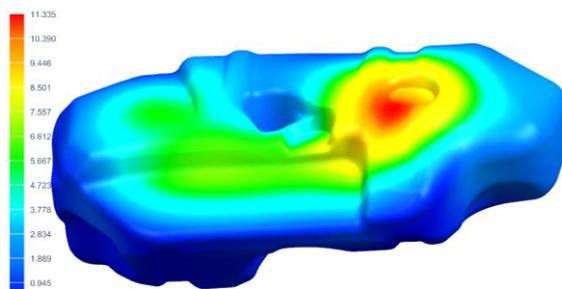


Рисунок 71 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант с перегородкой) при гидравлическом испытании

Tank without baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 11.335, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина



Tank without baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 11.335, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина

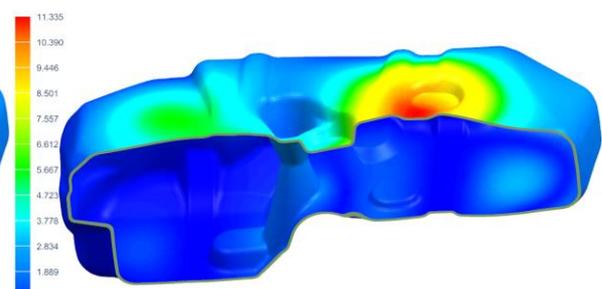
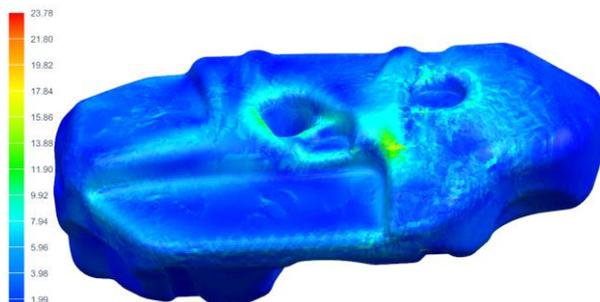


Рисунок 72 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант без перегородки), возникающих при гидравлическом испытании

Tank without baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Массе
 Мин. : 0.01, Макс. : 23.78, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина



Tank without baffle_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Массе
 Мин. : 0.01, Макс. : 23.78, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам, Величина

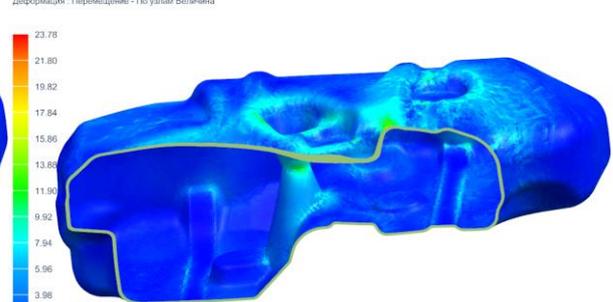


Рисунок 73 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант без перегородки) при гидравлическом испытании

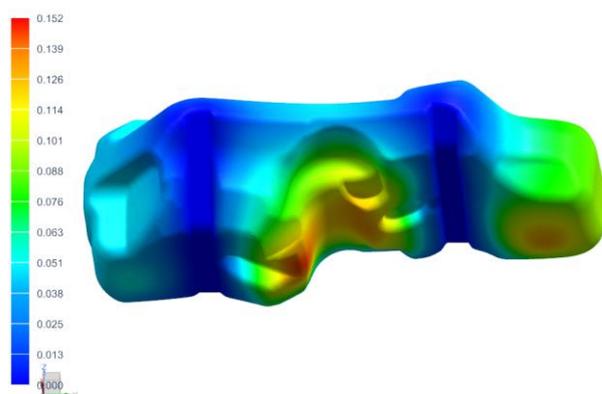
Вывод: вариант конструкции корпуса топливного бака без перегородки показал лучшие результаты как по максимальной деформации геометрии, так и по возникающим напряжениям. В случае варианта с перегородкой максимальное напряжение (69,38 МПа), как и в предыдущем испытании, возникает в зоне впавления перегородки в тело корпуса бака, и свидетельствует о сломе перегородки (предел прочности расчетного материала равен 24 МПа).

Результаты испытания на провисание сведены в таблицу 5, визуализация результатов приведена на рисунках 74-77.

Таблица 5 – Результаты испытания на провисание

Испытание на провисание			
Вариант с перегородкой		Вариант без перегородки	
Перемещение (max, мм)	0,15	Перемещение (max, мм)	0,18
Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	1,06	Напряжение (по элементам, по Мизесу) (max, МПа)	0,83

Tank with baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин.: 0.000, Макс.: 0.152, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Tank with baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин.: 0.000, Макс.: 0.152, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

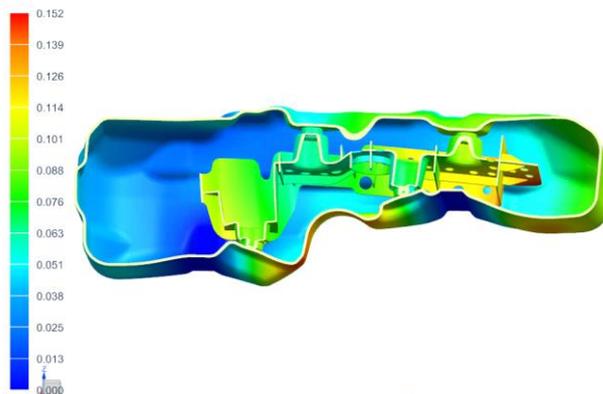


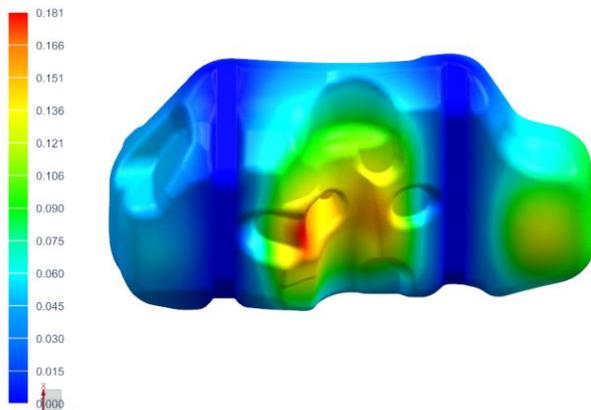
Рисунок 74 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант с перегородкой), возникающих при испытании на провисание

Tank with baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Мизесу
 Мин. : 0.000, Макс. : 1.057, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Рисунок 75 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант с перегородкой) при испытании на провисание

Tank without baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.181, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Tank without baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.181, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

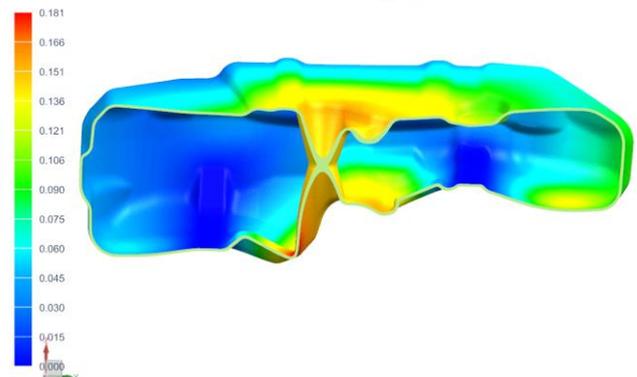


Рисунок 76 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант без перегородки), возникающих при испытании на провисание

Tank without baffle 50L_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам, По Мизесу
 Мин. : 0.001, Макс. : 0.830, Единицы = Н/мм²(МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Рисунок 77 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант без перегородки) при испытании на провисание

Вывод: в обоих случаях воздействие веса топлива на дно бака несущественно. В случае варианта без перегородки возникают несколько большие деформации, но меньшие напряжения.

Результаты испытания на стойкость к воздействию температур сведены в таблицу 6, визуализация результатов приведена на рисунках 78-81.

Таблица 6 – Результаты испытания на стойкость к воздействию температур

Испытание на стойкость к воздействию температур			
Вариант с перегородкой		Вариант без перегородки	
Перемещение (max, мм) (+80 °С)	6,80	Перемещение (max, мм) (+80 °С)	6,50
Перемещение (max, мм) (-40 °С)	7,49	Перемещение (max, мм) (-40 °С)	7,16

Tank with baffle_sim1 : Solution 2 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.000, Макс. : 6.802, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

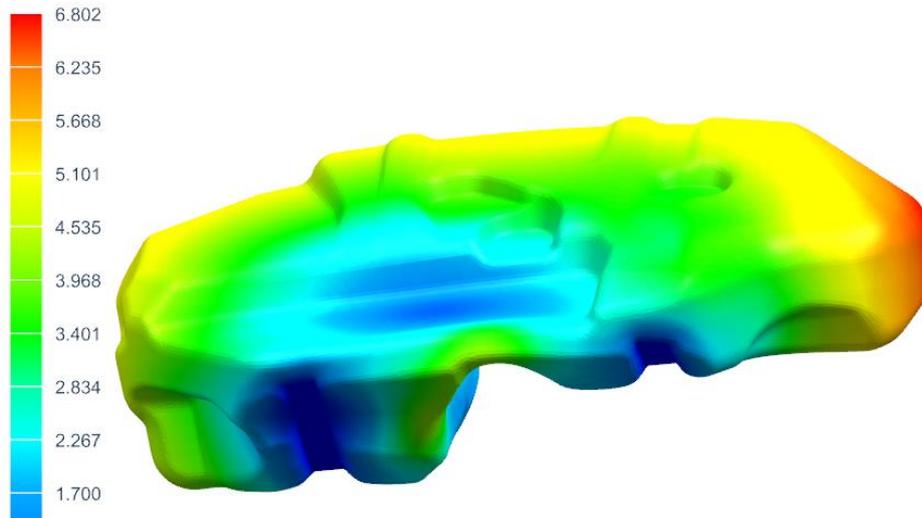
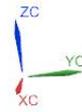


Рисунок 78 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант с перегородкой), возникающих при испытании на стойкость к воздействию температур, при +80 °С

Tank with baffle_sim1 : Solution 2 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.000, Макс. : 7.489, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

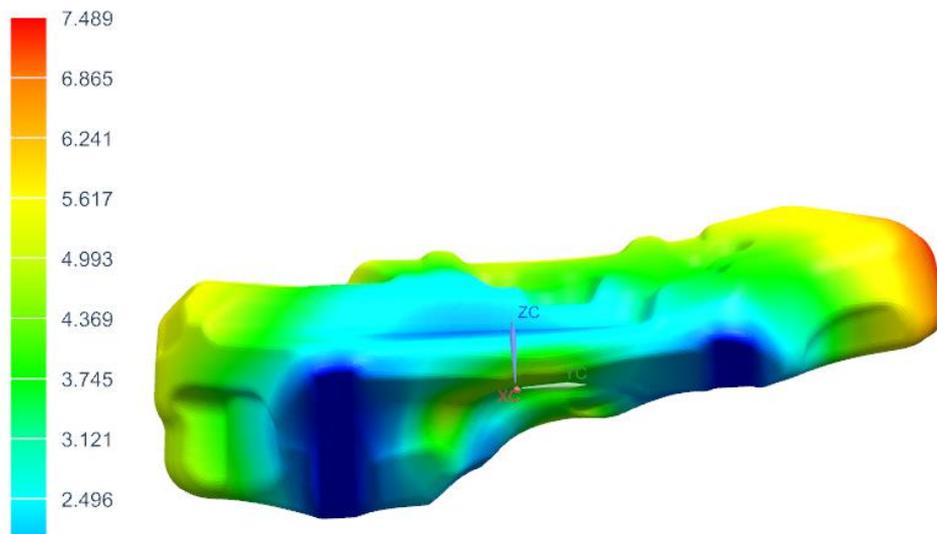


Рисунок 79 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант с перегородкой), возникающих при испытании на стойкость к воздействию температур, при -40 °С

Tank without baffle_sim1 : Solution 2 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.000, Макс. : 6.495, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

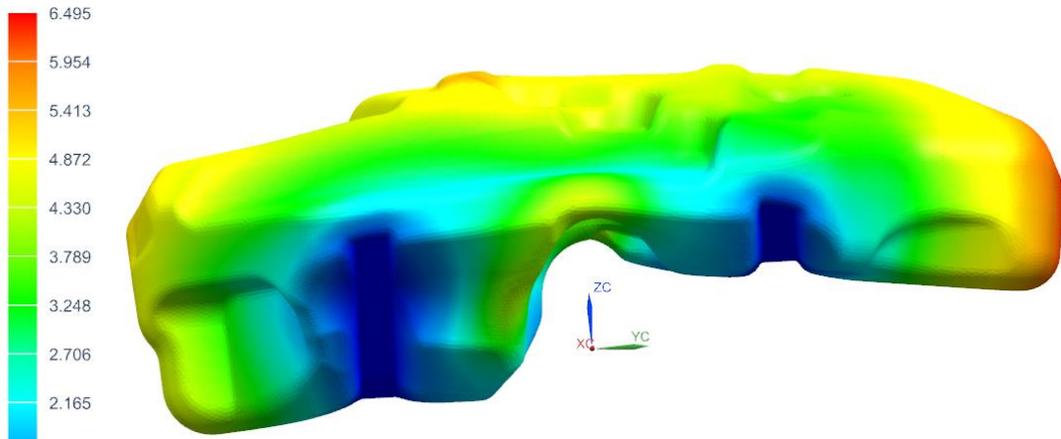


Рисунок 80 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант без перегородки), возникающих при испытании на стойкость к воздействию температур, при +80 °С

Tank without baffle_sim1 : Solution 2 Результат
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин. : 0.000, Макс. : 7.159, Единицы = мм
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

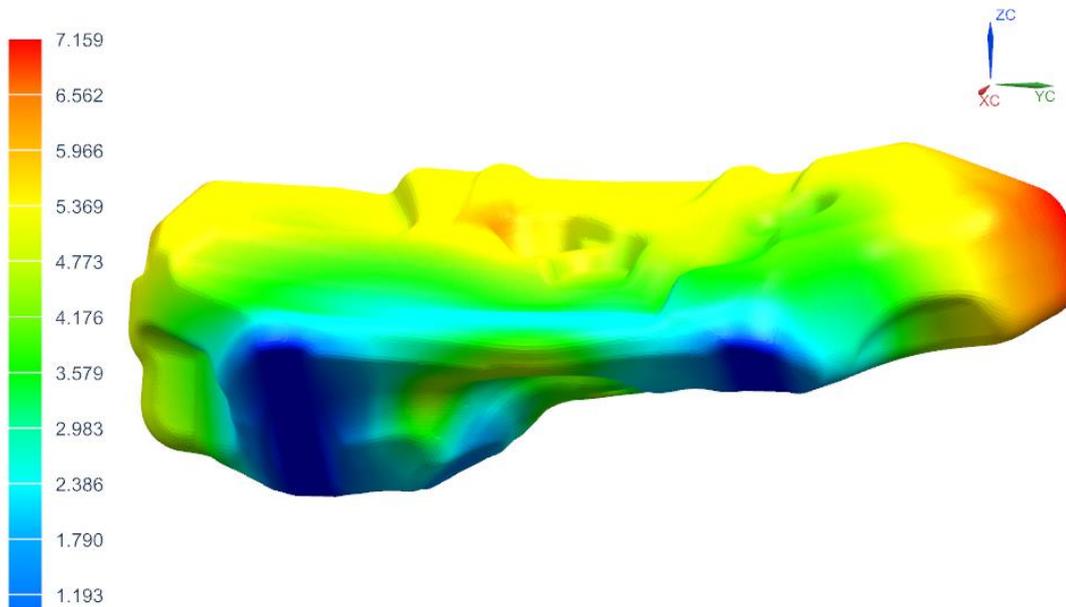


Рисунок 81 – Визуализация деформаций корпуса топливного бака (вариант без перегородки), возникающих при испытании на стойкость к воздействию температур, при -40 °С

Вывод: результаты по деформации корпусов топливных баков после применения температурной нагрузки схожие, с небольшим преимуществом у варианта без перегородки.

Результаты испытания на ударопрочность бака (при свободном падении) сведены в таблицу 7, визуализация результатов приведена на рисунках 82-83.

Таблица 7 – Результаты испытания на испытания на ударопрочность бака (при свободном падении)

Испытание на ударопрочность бака (при свободном падении)			
Вариант с перегородкой		Вариант без перегородки	
Напряжение (по элементам/узлам, по Мизесу) (max, МПа)	137,97	Напряжение (по элементам/узлам, по Мизесу) (max, МПа)	137,88

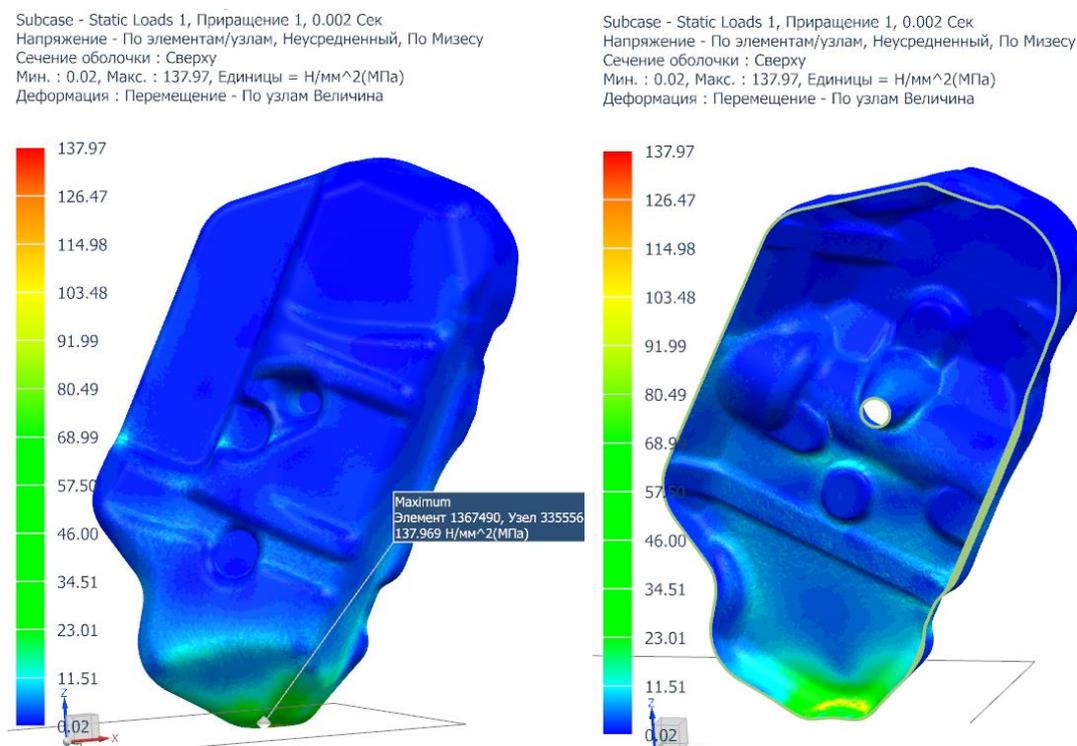
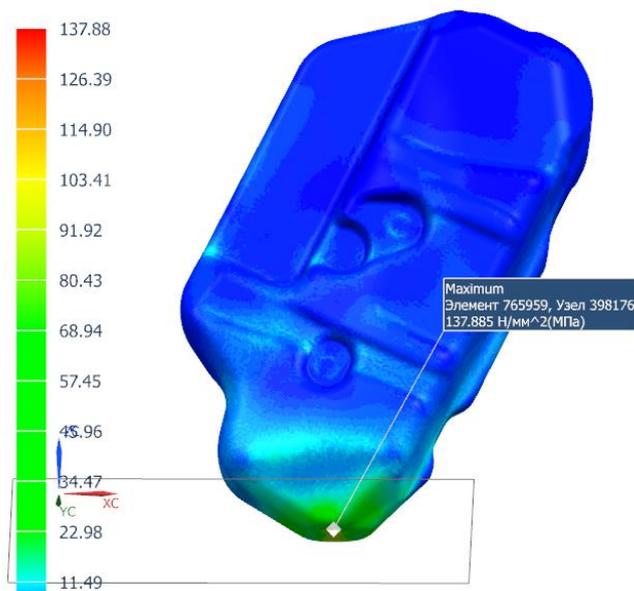


Рисунок 82 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант без перегородки) при испытании на ударопрочность бака

Subcase - Static Loads 1, Приращение 1, 0.002 Сек
Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
Сечение оболочки : Сверху
Мин. : 0.00, Макс. : 137.88, Единицы = Н/мм²(МПа)
Деформация : Перемещение - По узлам Величина



Subcase - Static Loads 1, Приращение 1, 0.002 Сек
Напряжение - По элементам/узлам, Неусредненный, По Мизесу
Сечение оболочки : Сверху
Мин. : 0.00, Макс. : 137.88, Единицы = Н/мм²(МПа)
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

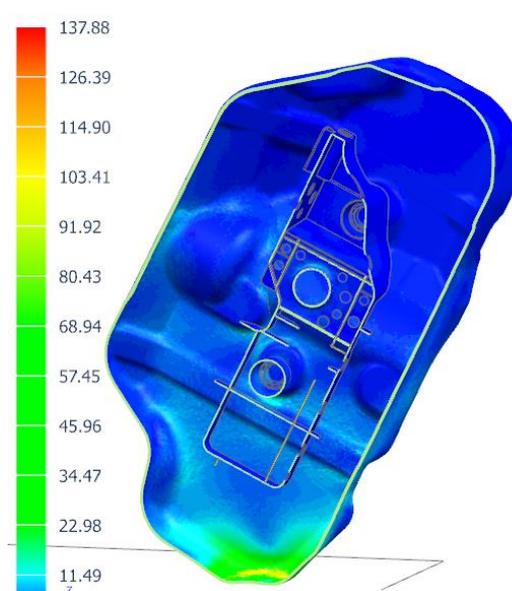


Рисунок 83 – Визуализация напряжений, возникающих в корпусе топливного бака (вариант с перегородкой) при испытании на ударопрочность бака

Вывод: максимальные напряжения, возникающие в результате симуляции падения корпуса топливного бака с шестиметровой высоты у двух вариантов конструкции топливного бака схожие, с несущественным преимуществом у варианта с перегородкой (меньше на 0,07%). Концентрация максимальных напряжений у обоих вариантов возникает в идентичных зонах. Однако, при оценке результатов и проецировании их на физические образцы, необходимо учитывать нередко встречающиеся на практике случаи повреждения корпуса топливного бака в зоне впадения перегородки в корпус, вызывающие негерметичность и приводящие к отрицательному результату испытания.

Выводы:

- Разработаны конечно-элементные модели на основании упрощенной геометрии корпусов топливных баков;

- Создан необходимый для симуляций материал, имеющий характеристики специально разработанных для производства топливных баков марок;
- Созданы расчётные модели для моделирования различных испытаний двух вариантов корпусов топливных баков;
- Проведено моделирование поведения конечно-элементной модели корпусов топливных баков при воздействии сил, давления и температур;
- По результатам анализа установлено, что предлагаемое изменение конструкции корпуса топливного бака не оказало негативного влияния на жёсткость конструкции корпуса топливного бака.

4 Методика совершенствования конструкции корпуса топливного бака в САПР

4.1 Описание методики проектирования конструкции топливных баков легковых автомобилей в САПР

Целью данной работы являлось создание методики совершенствования конструкции корпусов топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку, для экономии сырья и снижения себестоимости производства пластиковых топливных баков при сохранении их эксплуатационных характеристик.

Для реализации данной цели были при помощи САПР были решены заявленные задачи и достигнут положительный результат. На основании полученного положительного результата можно сделать вывод о целесообразности создания методики.

Данная методика позволит производить первичную оценку конструкции пластиковых топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку, и на ранних этапах определять возможность осуществления изменений в конструкции корпуса, не прибегая к необходимости создания дорогостоящих прототипов и проведения физических испытаний с ними.

Представление методики целесообразно выполнить в виде блок-схемы (рисунок 84) с последующим описанием каждого этапа (таблица 8).

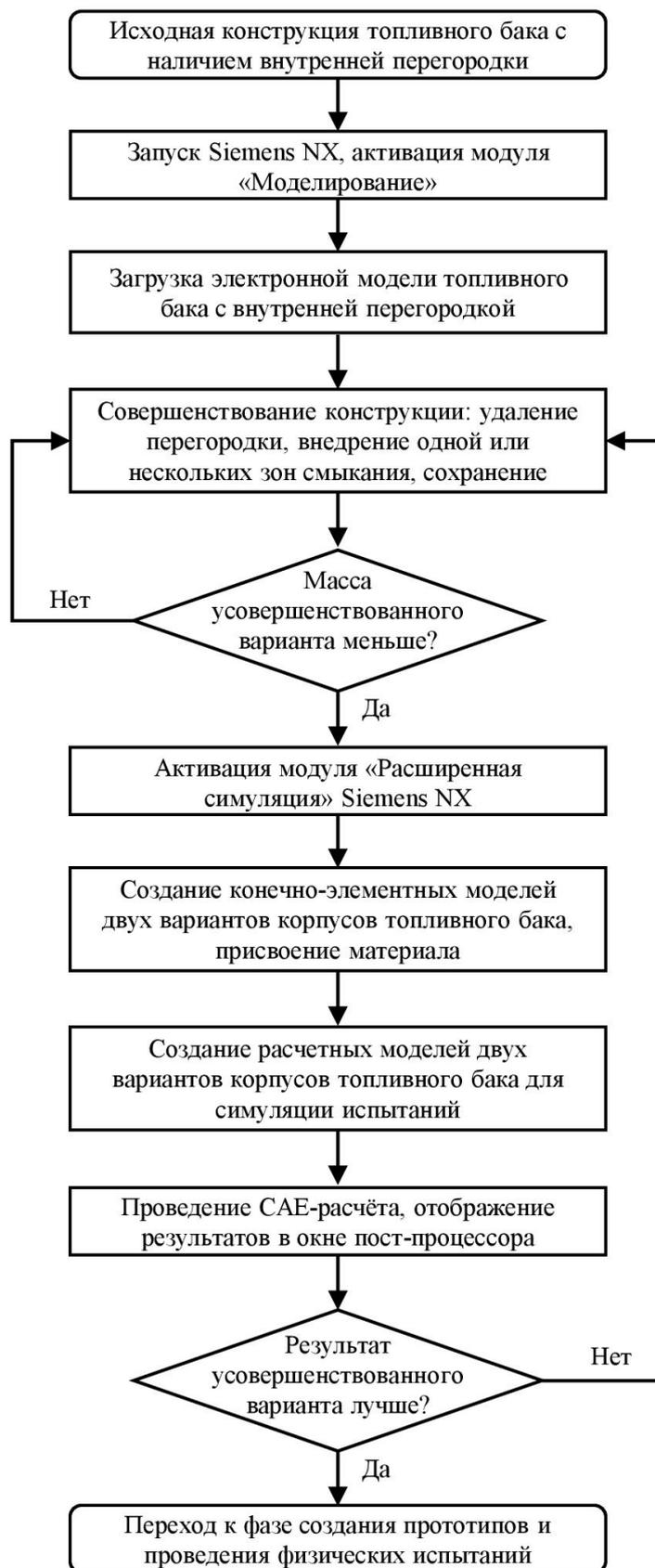


Рисунок 84 – Блок-схема методики совершенствования конструкции корпусов топливных баков

Таблица 8 – Описание этапов методики совершенствования конструкции топливных баков, перечисленных в блок-схеме

Наименование блока	Описание
Исходная конструкция топливного бака с наличием внутренней перегородки	На начальном этапе необходимо наличие существующей конструкции корпуса пластикового топливного бака, имеющего в составе внутреннюю перегородку. В случае создания корпуса топливного бака с нуля, целесообразней проектировать его изначально без внутренней перегородки.
Запуск Siemens NX, активация модуля «Моделирование»	Данная методика реализуема и на базе других существующих САПР. Выбор Siemens NX обусловлен возможностью осуществления работ по моделированию изменений в электронной модели корпуса топливного бака, а также сравнительного инженерного анализа в рамках одной САПР, не прибегая к стороннему программному обеспечению.
Загрузка электронной модели топливного бака с внутренней перегородкой	В случае наличия электронной модели в формате, отличающимся от формата Siemens NX, необходимо осуществить импорт модели в рабочее окно Siemens NX посредством заблаговременного её сохранения в «нейтральном» формате (STEP, IGES, Parasolid и т.д.) или воспользовавшись широкими возможностями Siemens NX по открытию моделей, созданных в сторонних САПР (CATIA, SolidWorks и т.д.).
Совершенствование конструкции: удаление перегородки, внедрение одной или нескольких зон смыкания, сохранение	Благодаря широким возможностям Siemens NX, внесение изменений в электронную модель корпуса топливного бака может быть успешно осуществлено при помощи имеющихся инструментов твердотельного и поверхностного моделирования. В зависимости от изначальной геометрии и размеров корпуса топливного бака, целесообразно размещать от одной до трёх (в редких случаях – больше) зон смыкания в зонах потенциального риска для механической прочности конструкции.
Проверка и сравнение массы	На данном этапе необходимо провести оценку и сравнение масс исходной и усовершенствованной конструкций. Как правило, вес используемой внутренней перегородки существенно больше, чем вес дополнительно вводимого объема, необходимого для создания зоны смыкания. В таком случае следует перейти к следующему этапу. В противном же случае совершенствование с целью снижения затрат сырья не имеет смысла и в таком случае необходимо вернуться на предыдущий этап и внести изменения в электронную модель, изменив количество или места расположения зон смыкания, повторно проведя сравнение масс.
Активация модуля «Расширенная симуляция» Siemens NX	Для перехода к началу инженерного анализа необходимо активировать имеющийся в составе Siemens NX модуль инженерного анализа – «Расширенная симуляция».

Продолжение таблицы 8

Создание конечно-элементных моделей двух вариантов корпусов топливного бака, присвоение материала	На данном этапе осуществляется нанесение конечно-элементной сетки на геометрию двух вариантов корпусов топливных баков – исходную (с внутренней перегородкой) и усовершенствованную (с зонами смыкания). Производится присвоение (назначение) материала из базы данных имеющихся в составе Siemens NX материалов или же базы данных самостоятельно созданных/импортированных материалов, имеющих необходимые свойства и характеристики.
Создание расчётных моделей двух вариантов корпусов топливного бака для симуляции испытаний	На данном этапе осуществляется задание всех необходимых условий для моделирования конкретного испытания (температурные условия, действующие силы и нагрузки, направление их применения), выбирается подходящий тип решателя.
Проведение CAE-расчёта, отображение результатов в окне пост-процессора	На данном этапе запускается просчёт заданных условий применительно к конечно-элементной модели. По окончании расчета появляется возможность запуска интерфейса пост-процессора с широким спектром возможностей по настройке отображения и анализа полученных результатов.
Проверка и сравнение результатов инженерного анализа	На данном этапе результаты исходной и усовершенствованной конструкций сравниваются друг с другом. В случае получения отрицательного результата (усовершенствованная конструкция показывает худшие результаты, нежели исходная), необходимо вернуться на этап совершенствования конструкции в модуле «Моделирование» и внести изменения в электронную модель, изменив количество или места расположения зон смыкания. При необходимости возможно внедрение рёбер жесткости.
Переход к фазе создания прототипов и проведения физических испытаний	После получения положительного результата на предыдущем этапе, необходимо повторно оценить целесообразность внедрения подобного изменения, оценить экономический эффект и срок окупаемости и только после этого принять решение о начале фазы создания прототипов и проведения экспериментов с ними.

Созданная и описанная выше методика позволяет на ранних этапах выявить возможность или невозможность совершенствования корпусов пластиковых топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку. За несколько итераций может быть определен наилучший вариант конструкции, достойный проведения эксперимента. Или же сделан вывод о невозможности или нецелесообразности совершенствования, не прибегая к

затратам средств на создание прототипов, испытательной оснастки, подготовку, планирование и проведение эксперимента.

4.2 Направление совершенствования конструкции топливных баков

В качестве рекомендаций по дальнейшему совершенствованию конструкции топливных баков для легковых автомобилей, а также методов их проектирования, можно выделить следующие пункты:

- Изначальная нацеленность на проектирование конструкции корпуса топливного бака без внутренней перегородки: либо с применением рёбер жесткости (рисунок 85), либо – зон смыкания (рисунок 86);
- Проведение дополнительных симуляционных испытаний в САПР в рамках инженерного анализа разрабатываемой конструкции, с целью определения уровня шума, вызываемого перемещением топлива;
- При неудовлетворительных показателях уровня шума, превышающих желаемые целевые показатели, в первую очередь рассматривать изменения конструкции корпуса топливного бака, не связанные с проектированием внутренней погружной перегородки. Примером возможного решения по ограничению перемещения топлива внутри топливного бака могут являться «натуральные» перегородки (рисунок 87), полученные при помощи пресс-формы в процессе выдувного формования бака, представляющие собой подобие рёбер жесткости;
- Рассматривать применение в конструкции внутренних перегородок только в случае невозможности достижения целевых показателей по уровню шума даже при применении «натуральных» перегородок, расположенных в различных местах топливного бака, подтверждённой результатами симуляционных испытаний;

- Отдавать предпочтение проектированию внутренних перегородок, устанавливаемых внутри корпуса топливного бака во время процесса сборки бака на сборочной линии, нежели перегородок, вплавляемых в корпус топливного бака во время процесса выдувного формования, во избежание возможных дополнительных проблем, вызванных локальным утонением материала корпуса топливного бака в зонах сплавления перегородки.

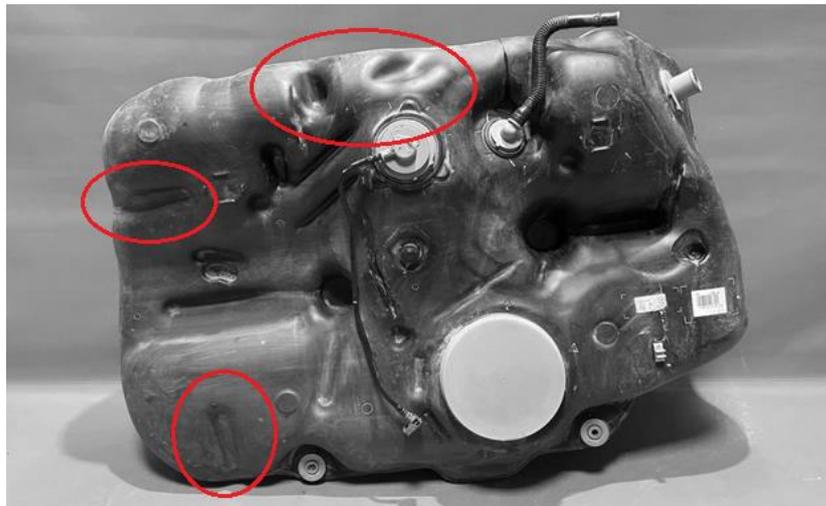


Рисунок 85 – Пример применения рёбер жесткости на корпусе топливного бака



Рисунок 86 – Пример применения зон смякания на корпусе топливного бака

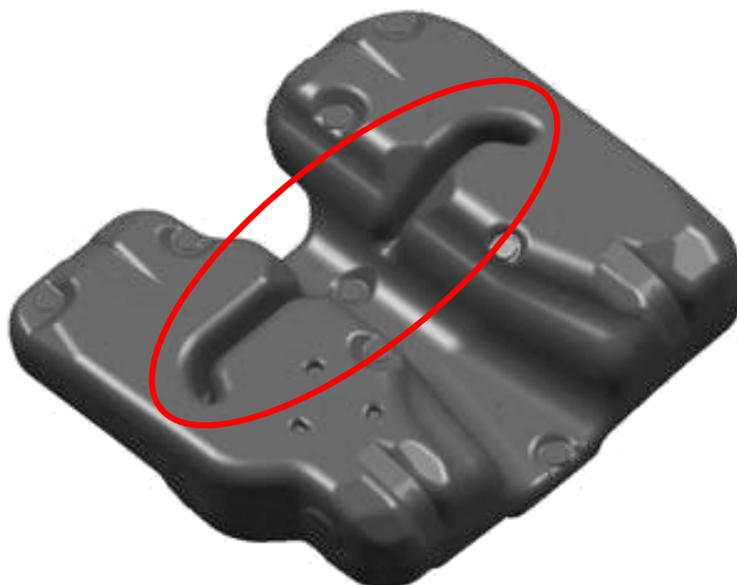


Рисунок 87 – Пример применения «натуральной» перегородки на корпусе топливного бака

Выводы:

- В ходе работы над главой была составлена блок-схема методики совершенствования конструкции корпусов топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку;
- Подробно описан каждый этап методики, перечисленный в блок-схеме;
- Составлены рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции топливных баков для легковых автомобилей, а также методов их проектирования.

Заключение

В процессе выполнения работы, в первом разделе был проведен анализ информации по изменению конструкции топливных баков с течением времени; приведены сведения о материалах, применяемых при изготовлении, и структуре стенки корпуса пластикового топливного бака; определено, что внутренние перегородки широко применяются в конструкции топливных баков, в случае пластиковых топливных баков будучи изготовленными из материала, являющегося основным при производстве корпусов топливных баков; определены целесообразность разработки методики совершенствования конструкции топливных баков и программное обеспечение, являющееся базой для её практического применения.

Во втором разделе были построены трёхмерные модели корпуса топливного бака и внутренней перегородки, описан процесс их создания, а также создана трёхмерная сборка топливного бака в сборе с входящими в его состав компонентами. Кроме того, произведено совершенствование трёхмерной модели корпуса топливного бака, заключающееся в применении зоны смыкания взамен внутренней перегородки, результатом чего стало получение двух вариантов конструкции корпусов топливных баков, необходимых для проведения дальнейшего сравнительного инженерного анализа.

В третьем разделе приведены теоретические сведения о методе конечных элементов; описан процесс подготовки электронной модели корпуса топливного бака к инженерному анализу и построения на ней сетки конечных элементов; описан процесс создания и применения материала, необходимого для проведения расчёта; на основании конечно-элементных моделей созданы расчётные модели для симуляции различных испытаний корпусов топливных баков; проведён сравнительный анализ полученных результатов и сделаны выводы об успешности изменения геометрии корпуса топливного бака.

В четвёртом разделе представлена методика совершенствования конструкции корпусов топливных баков, имеющих в составе внутреннюю перегородку, оформленная в виде пошагового, подробно описанного алгоритма, а также определены дальнейшие рекомендуемые шаги при проектировании конструкции топливных баков или создании методов их проектирования.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Бахмутов С.В., Козлов А.В., Теренченко А.С. Водород на транспорте: ДВС или топливные элементы // Актуальные вопросы машиноведения. С. 36-39. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50016310_66186501.pdf (дата обращения: 07.03.2024).
2. Ведмидь П. А. Основы NX САМ / П.А. Ведмидь. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 216 с.
3. Гончаров П. С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
4. Гончаров П.С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 112 с.
5. Гончаров П. С. NX для конструктора-машиностроителя / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осюк. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 504 с.
6. ГОСТ Р 41.34-2001 (Правила ЕЭК ООН № 34) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении предотвращения опасности возникновения пожара.
7. Гребеножко А.В., Слаутин О.В. Конструкция современного топливного бака автотранспортного средства // NovaInfo. С. 91-96. URL: <https://novainfo.ru/article/11286> (дата обращения: 07.03.2024).
8. Данилов Ю.В. Практическое использование NX / Ю.В. Данилов, В.А. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
9. Ельцов, М. Ю. Основы расчета изделия на прочность в приложении NX Расширенная симуляция / М. Ю. Ельцов, П. А. Хахалев. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2014. – 207 с.

10. Ельцов М.Ю. Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М.Ю. Ельцов, А.А. Козлов, А.В. Седойкин, Л.Ю. Широкова. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 752 с.: ил.
11. Краснов М.В. Unigraphics для профессионалов / М.В. Краснов, Ю.В. Чигишев. – М.: Лори, 2004. – 320 с.: ил.
12. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.: ил.
13. Почекуев, Е.Н. Основы методов автоматизированного проектирования штампов листовой штамповки в САПР : электронное учеб.-метод. пособие / Е.Н. Почекуев. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2014. – 158с.
14. Розов Ю.Г. Методика использования конечно-элементного анализа в расчётах на прочность // Проблемы информационных технологий. С. 18-25.
15. Тороп Д.Н. Teamcenter. Начало работы / Д.Н. Тороп, В.В. Терликов. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 280 с.
16. Унянин А. Н. Моделирование и инженерный анализ с помощью программного комплекса NX : учебное пособие / А.Н. Унянин, А.Д. Евстигнеев. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 212 с.
17. Унянин А.Н. Инженерные расчеты с помощью программного комплекса NX : учебное пособие / А. Н. Унянин ; под ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 126 с.
18. Шафигуллин Л.Н., Сотников А.М., Романова Н.В., Шабаетова Е.С., Саримов Д.Р. Разработка полимерного топливного бака с высокими барьерными свойствами // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018. С. 191-194.
19. Ashish T. Patil, N.K. Kelageri. Design Evaluation of Fuel Tank & Chassis Frame for Rear Impact of Toyota Yaris // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). С. 1491-1496. URL: <https://www.irjet.net/archives/V3/i5/IRJET-V3I5304.pdf> (дата обращения: 07.03.2024).

20. Edmund Maputi, Dr. G. Satish Babu. Evaluation of Vehicle Fuel Tank Impact Resistance // International Journal of Science and Research (IJSR). С. 1428-1433. URL: https://www.academia.edu/8076984/Evaluation_of_Vehicle_Fuel_Tank_Impact_Resistance (дата обращения: 07.03.2024).

21. Fukuhara, K., Hara, M., Matsuura, N., Watanabe, H. Development of Plastic Fuel Tank Using Modified Multi-Layer Blow Molding // SAE Technical Paper. С. 1-11. URL: <https://doi.org/10.4271/900636> (дата обращения: 07.03.2024).

22. Jing Zhao, Charbel Kanaan, Robert Clement, Benoit Brule, Henri Lenda, Anne Jonquieres. Permeability of EVOH Barrier Material Used in Automotive Applications: Metrology Development for Model Fuel Mixtures // Oil & Gas Science and Technology. С. 353-366. URL: https://www.researchgate.net/publication/262836228_Permeability_of_EVOH_Barrier_Material_Used_in_Automotive_Applications_Metrology_Development_for_Model_Fuel_Mixtures (дата обращения: 07.03.2024).

23. Prevention of fire risks : UN ECE Regulation No. 34. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R034r2e.pdf> (дата обращения: 07.03.2024).

24. R. Thundil Karuppa Raj, T. Bageerathan, G. Edison. Design of fuel tank baffles to reduce kinetic energy produced by fuel sloshing and to enhance the product life cycle // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. С. 244-249. URL: https://www.academia.edu/83537291/Design_of_Fuel_Tank_Baffles_to_Reduce_Kinetic_Energy_Produced_by_Fuel_Sloshing_and_to_Enhance_the_Product_Life_Cycle (дата обращения: 07.03.2024).

25. Singiresu S. Rao. The Finite Element Method in Engineering – Elsevier Inc., 2005. – 663 с.

26. T. Sethuram, R. Rajamani and K. Prakasan. Experimental and numerical analysis of modal properties for automotive fuel tank // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. С. 711-718. URL: <https://www.researchgate.net/>

publication/287019398_Experimental_and_numerical_analysis_of_modal_properties_for_automotive_fuel_tank (дата обращения: 07.03.2024).

27. Ujjal Kalita, Twisampati Roy Chowdhury, Shahid Khan, Alok Mishra, Santosh Kumar Behera, Manminder Singh Malhi. Optimization of fuel tank using baffles to reduce sloshing effect // Jetir. С. 307-313. URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2104241.pdf> (дата обращения: 07.03.2024).

28. Xianfeng Yang, Zhiqiang Zhang, Jialing Yang, Yuxin Sun. Fluid-structure interaction analysis of the drop impact test for helicopter fuel tank // SpringerPlus. С. 1-21. URL: https://www.researchgate.net/publication/308124038_Fluid-structure_interaction_analysis_of_the_drop_impact_test_for_helicopter_fuel_tank (дата обращения: 07.03.2024).

29. Yash Deshmukh, Shridhar Savat, Anjana Prakash, Kalpesh Patil, Rohit Patil, Dr. Elaya Perumal. Optimization and Reduction of Sloshing in the Fuel Tank // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). С. 2793-2800. URL: https://www.academia.edu/78468844/Optimization_and_Reduction_of_Sloshing_in_the_Fuel_Tank (дата обращения: 07.03.2024).

30. Zohir Benrabah, Francis Thibault, Robert DiRaddo. Modeling of Fuel Permeation in Multilayer Automotive Plastic Fuel Tanks // SAE International Journal of Materials and Manufacturing. С. 449-459. URL: https://www.researchgate.net/publication/314079533_Modeling_of_Fuel_Permeation_in_Multilayer_Automotive_Plastic_Fuel_Tanks (дата обращения: 07.03.2024).