

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Автотракторный»
Кафедра «Колесные и гусеничные машины»

РЕЦЕНЗЕНТ
инженер-метролог АС «СЦ АТТ»

_____/ Серов С.И.
«__» _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
к.т.н., доцент

_____/ В.Н. Бондарь/
«__» _____ 2018 г.

Проверка соответствия кабины катка RV-21 требованиям защиты
оператора при опрокидывании машины

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–23.04.02.2018.214.000ПЗ ВКР

Руководитель проекта,
д.т.н, профессор
_____/И.П. Трояновская/
«__» _____ 2018 г.

Автор проекта,
студент группы П-206
_____/М.Ю. Симанков/
«__» _____ 2018 г.

Нормоконтролер,
к.т.н., доцент
_____/В.И. Дуюн/
«__» _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Симанков М.Ю. Проверка соответствия кабины катка RV-21 требованиям защиты оператора при опрокидывании машины – Челябинск: ЮУрГУ, КГМ, П-206, ПЗ – 90 с., 57 ил., библиографический список – 30 наименований, графический материал – 14 листов А4.

Ключевые слова: натурный эксперимент, численный эксперимент, компактор, каток-уплотнитель, ROPS (roll over protective structure), кабина катка RV-21.

Выпускная квалификационная работа посвящена анализу требований по оценке соответствия защитного устройства ROPS кабины катка RV-21 при опрокидывании. В работе проведен натурный и численный эксперимент согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 3471-99. Сравнение результатов эксперимента и расчета показал возможность замены натуральных испытаний математической моделью.

Работа состоит из: введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографический список. Первая глава посвящена актуальности темы исследований. Во второй главе приведены требования сертификации, методика оценки защитных устройств ROPS и их классификация. Третья глава посвящена натурному эксперименту, а четвертая – численному эксперименту.

					<i>ЮУрГУ –23.04.02.2018.214.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>СиманковМ.Ю</i>			<i>АННОТАЦИЯ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Трояновская</i>					<i>3</i>	<i>90</i>
<i>Н. Контр.</i>		<i>Дуюн В.И.</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра «К и ГМ»</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Бондарь В.Н.</i>						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	6
1.1 Важность проблемы свалок.....	6
1.2 Спецтехника для свалок	10
1.3 Производители уплотнителей отходов	22
1.4 Требования к безопасности уплотнителей мусора	30
1.5 Классификация защитных кабин ROPS.....	33
1.6 Цель и задачи исследования.....	35
1.7 Выводы по главе	35
2 ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ.....	36
2.1 Современная методика оценки соответствия	37
2.2 Выводы по главе	42
3 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КАБИНЫ	43
3.1 Описание испытательного стенда	43
3.2 Боковое нагружение	45
3.3 Вертикальное нагружение	50
3.4 Продольное нагружение	52
3.5 Выводы по главе	54
4 ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ КАБИНЫ RV-21	55
4.1 Выбор программного обеспечения	55
4.2 Методика расчетов методом конечных элементов	61
4.3 Построение 3D модели кабины RV-21	62
4.4 Боковое нагружение кабины RV-21	71
4.5 Вертикальное нагружение кабины RV-21	75
4.6 Продольное нагружение кабины RV-21	80
4.7 Оценка результатов численного эксперимента	84
4.8 Оценка адекватности численного эксперимента.....	85
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ.....	87
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	88

										Лист
										4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ					

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнители твердых бытовых и промышленных отходов (компакторы) это специальные многоцелевые машины, выполняющие операции уплотнения, измельчения и планировки отходов и изолирующих слоев грунта. Как любая землеройная техника эти машины требуют сертификации узлов и агрегатов, обеспечивающих безопасность оператора. Проблема повышения безопасности работы оператора имеет важное значение.

Цель исследования – проверка соответствия устройства защиты оператора при опрокидывании машины ROPS требованиям безопасности.

Существующие методики оценки безопасности кабин основаны на натуральных испытаниях, что является дорогостоящим мероприятием. В настоящее время, в связи с лавинообразным развитием информационных технологий особую роль приобретает разработка методики расчетной оценки работоспособности защитных конструкций в конкретных аварийных условиях, в соответствии с существующими требованиями ГОСТ Р ИСО 3471-99.

Обоснованием возможности проведения идентичной замены экспериментального метода на расчетный метод является хорошая сходимость результатов экспериментальных и расчетных исследований.

В данной выпускной квалификационной работе выполнена оценка соответствия защитного устройства ROPS на примере кабины катка PV-21 фирмы «РАСКАТ» г. Рыбинск.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Важность проблемы свалок

Бытовая и производственная деятельность связана с образованием значительного количества отходов, большая часть которых не подлежит последующей переработке. Ежедневно на одного человека образуется до 2 кг бытовых отходов, при этом имеются тенденции к увеличению указанного объёма. Ежегодно город с населением около 1 млн чел. выбрасывает на прилегающие территории до 0,4 млн тонн твердых бытовых отходов. По этой причине проблема захоронения мусора приобретает всё большую остроту.

Все чаще и чаще в современном обществе поднимаются вопросы на тему экологии. Это и повсеместное загрязнение воздуха промышленными отходами и газами, и загрязнение водоемов, а также проблема мусора и утилизации отходов. Вывоз мусора, особенно из больших городов, становится все большей проблемой современности. Ни одна из развитых и развивающихся стран не может похвастаться налаженной системой утилизации отходов. На сегодняшний день только 60% отходов получают вторую жизнь путем переработки, куда же деть оставшиеся 40%? Сжигание или захоронение не особо целесообразно, что осложняет и без того накаленную обстановку. Экологическая проблема мусора приобретает пугающие масштабы, ведь с каждым днем количество не переработанных отходов только возрастает, и никто не может дать четких указаний для борьбы с этой проблемой. В Италии, к примеру, уже несколько городов просто завалены не утилизируемыми отходами. Проблема мусора дает о себе знать наиболее остро в таких городах, как Неаполь и Палермо. Чтобы хоть как-то освободить для себя жилое природное пространство, жители сжигают мусор прямо на центральных площадях города. Страшно сказать, что творится на окраинах этих городов. Зловонные пары клубятся в воздухе и загрязняют и без того ужасный воздух.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

Любой населенный пункт – это искусственно созданная и поддерживаемая человеком среда, в которой только человек – может поддерживать чистоту и порядок.

Любое село, как и город, является крайне неустойчивой системой, зачастую полностью утратившей способность к самовосстановлению под воздействием негативных экологических факторов среды. В наше время, село, забытое властями, зарастает мусором и зарослями сорняков и является опасной зоной для проживания в ней человека. Поэтому велика вероятность появления различных экологических проблем.

Самый распространенный до последнего времени способ борьбы с бытовыми отходами в городах – вывоз их на свалки (рисунок 1.1) – не решает проблему, а, прямо скажем, усугубляет ее.



Рисунок 1.1 – Вывоз мусора на свалку

Вывоз мусора на свалку – самый дешёвый, но при этом недальновидный способ его утилизации. Недальновидный он в первую очередь потому, что мусор остаётся мусором. Свалки вокруг городов занимают огромные площади.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

процентов от массы исходного мусора. Поэтому все шлаки, которые остаются после сгорания, всё равно приходится вывозить на свалки.

Во-вторых, мусор содержит много влаги и трудносгораемых материалов, поэтому горит плохо. Неполное сгорание мусора приводит к выбросу огромного количества сажи и вредных органических соединений. Чтобы подобные вещества не выделялись, температура сгорания мусора должна быть выше 1200 С, но при простом сгорании мусора температура редко превышает 800 С. Приходится либо не давать энергии сгорания мусора рассеиваться, либо специально подогревать горящий мусор.

Есть проекты по сжиганию мусора в расплавах солей, расплавленном железе и т.д. Были даже идеи добавлять мусор в доменные печи, что вряд ли улучшило бы качество получаемого чугуна. В любом случае сжигание мусора – процесс, требующий специальных мер безопасности.

Свалки – это не только эпидемиологическая опасность, они неизбежно становятся мощным источником биологического загрязнения. Происходит это из-за того, что анаэробное (без доступа воздуха) разложение органических отходов сопровождается образованием взрывоопасного биогаза, который может представлять угрозу для человека, вредно воздействует на растительность, отравляет воду и воздух. Более того, главный компонент биогаза – метан – признан одним из виновников возникновения парникового эффекта, разрушения озонового слоя атмосферы и прочих бед глобального характера. В общей сложности из отходов в окружающую среду попадает более ста токсичных веществ. Нередко свалки горят, выбрасывая в атмосферу ядовитый дым.

Под полигоны для мусора на десятки лет отчуждаются громадные территории, их, безусловно, можно было бы использовать с большей пользой. И, наконец, чтобы обустроить полигон и содержать его на уровне современных экологических требований, нужны большие средства. Очень дорого обходится рекультивация закрытых (уже не действующих) полигонов. Это целый комплекс мер, цель которых – остановить вредное воздействие свалок на окружающую среду, в том числе на почву и подземные воды. Рекультивация всего лишь одного гектара мусорного полигона обходится сегодня в 6 миллионов рублей.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Велики и транспортные расходы на перевозку отходов, поскольку свалки, как правило, располагаются далеко от города [1].

Основным методом обезвреживания твердых бытовых и промышленных отходов остается полигонный метод, основанный на применении современных технологий. Порядок эксплуатации полигонов основан на использовании современной технологии с использованием специальной тракторной техники для утрамбовывания свалок.

1.2 Спецтехника для свалок

В России складирование и утилизация твердых бытовых и промышленных отходов на специально отведенных для этого полигонах, до сих пор производится по старым технологиям, имеющим ряд недостатков. Как правило, свезенные на полигон отходы, смещаются и разравниваются только бульдозерами. При таком методе твердых бытовых и промышленных отходов практически не уплотняются, т.к. давление, оказываемое гусеницами на поверхность грунта небольшое. Из-за недостаточного уплотнения образуется мягкая воздушная подушка, которая подвержена самовозгоранию, особенно в летний период, что способствует скоплению гниющей жижи. Кроме того, такой метод утилизации твердых бытовых и промышленных отходов способствует только разрастанию свалок и привлечению для этих целей все больших и больших площадей. твердых бытовых и промышленных отходов недостаточно равномерно разровнять по всему полигону, их необходимо разрушить, и по возможности, измельчить, уплотняя и пересыпая покрывным грунтом.

Можно привести примеры свалок по типу складироваемых отходов: свалки строительного мусора и породных масс; бытовых отходов; смешанные свалки (бытовой мусор в сочетании с вредными веществами); свалки вредных веществ и свалки особого характера.

На свалки попадают специфические материалы, классификация и возможность складирования которых зависят от ряда условий.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1) Грунт из выемок; грунты нельзя складировать на свалках бытового мусора, их целесообразно использовать в качестве обратной засыпки и прочих строительных работах. При наличии вредных веществ в зависимости от степени загрязнения и их типа рекомендуется складирование грунтов в специальных свалках для вредных веществ, а в лучшем случае предусматривать очистку грунтов. Очищенный материал следует вновь использовать при земляных работах.

2) Строительный мусор (обломки); без предварительной подготовки эти материалы не подлежат складированию на свалке. В настоящее время 60% отходов состоят из подобных материалов и эта тенденция нарастает. С целью дальнейшего использования в качестве наполнителя или оснований для мостовых, тротуаров и т.д. отходы должны быть переработаны. Деревянные перекрытия и балки можно использовать в измельченном виде как сырье для производства древесно-стружечных плит. Металлы и железобетонные конструкции подлежат дальнейшему использованию после разделения электромагнитным способом, а остаточные продукты, непригодные для последующего применения, складировются. Условием дальнейшего использования является не загрязненность (чистота) строительного мусора. Например, обломки объектов химической промышленности подвергаются тщательному анализу с целью определения возможностей и способов складирования или очистки; около 90% таких материалов подлежат дальнейшему использованию.

3) Золошлаки электростанций; такого рода продукты насыщены вымываемыми (выщелачиваемыми) веществами типа солей, металлов, серы и т.д., особенно продукты электростанций с десульфурующими установками для дымового газа. Шлаки металлургической промышленности имеют такие же показатели. Согласно TA-Abfall эти вещества классифицируются как вредные, которые при складировании или дальнейшем использовании в качестве стройматериалов, наполнителей в производстве вяжущих материалов требуют особой обработки. Золой и шлаки MVA (установки для сжигания мусора) также

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

требуют специального складирования, если они не были доведены до инертного состояния.

4) Бытовые отходы; к ним относят собственно бытовой мусор, отходы различных промыслов, крупногабаритный мусор, отходы синтетических продуктов, стекло, бумага, пищевые отходы, текстиль всех видов и т.д. С целью дальнейшего использования сбор таких, почти незагрязненных, продуктов должен производиться отдельно. Крупногабаритный мусор также перерабатывается, так что примерно 40-50% массы бытового мусора может быть вторично использовано. Первостепенное значение имеет тщательная сортировка и хранение этих материалов. Оставшиеся 50% бытового мусора подлежат складированию или сжиганию.

5) Шламы; к этой группе относятся очистные и нефте-шламы, смеси солей, шламы красителей, бурения, осадочного происхождения, гипсовые, шлифовочные и т.п. Эти продукты чаще всего оказываются загрязненными вредными веществами и не подлежат складированию на свалках бытового мусора. В качестве примера можно назвать очистные шламы из бытовых установок для очистки сточных вод, которые сильно загрязнены тяжелыми металлами, что делает недопустимым их использование в сельском хозяйстве. Такие шламы либо подвергаются очистке и используются как удобрения, либо складироваются после доведения до определенной кондиции.

Возможна также нейтрализация вредных веществ путем упрочнения шламов очистных сооружений и последующего их складирования. Такой же обработке и последующему складированию могут подвергаться и другие типы шламов.

Незагрязненные шламы можно складировать отдельно на «моносвалках» и в дальнейшем их утилизировать. Совместное складирование шламов и бытового мусора недопустимо.

При формировании шламовых «моно-свалок» возникает проблема обеспечения устойчивости этих техногенных массивов, которая может быть решена благодаря применению специальной технологии укладки шламов. Для

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

обеспечения безаварийной эксплуатации объекта сопротивление вращательному срезу уложенного материала должно, например, составлять? $f = 0,25$ МПа.

б) Отходы особого характера: согласно специального каталога, имеется 400 типов таких отходов. Это вещества, которые входят в 1-ю и 2-ю группы списка ядовитых веществ и присутствуют в шламах, породах, строительном мусоре, а также могут складироваться в жидком состоянии в контейнерах на специальных свалках. При этом сохраняются предпосылки для дальнейшей обработки подобных свалок.

Складирование таких веществ предполагает (рисунок 1.2) их предварительную обработку (термическую, физико-химическую и т.д.).

Специальная свалка рассматривается как временная (промежуточная). Складируемый материал подлежит последующей обработке для снижения загрязнения (например, путем нейтрализации) до определенного уровня. Радиоактивные отходы складировются в постоянных подземных могильниках.

Свалки специального характера в качестве временных хранилищ должны отвечать строгим требованиям безопасности, включая транспорт, сортировку, технологию укладки, перехват фильтрационных вод, защиту прилегающих территорий на основе имеющихся технических средств[2].

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

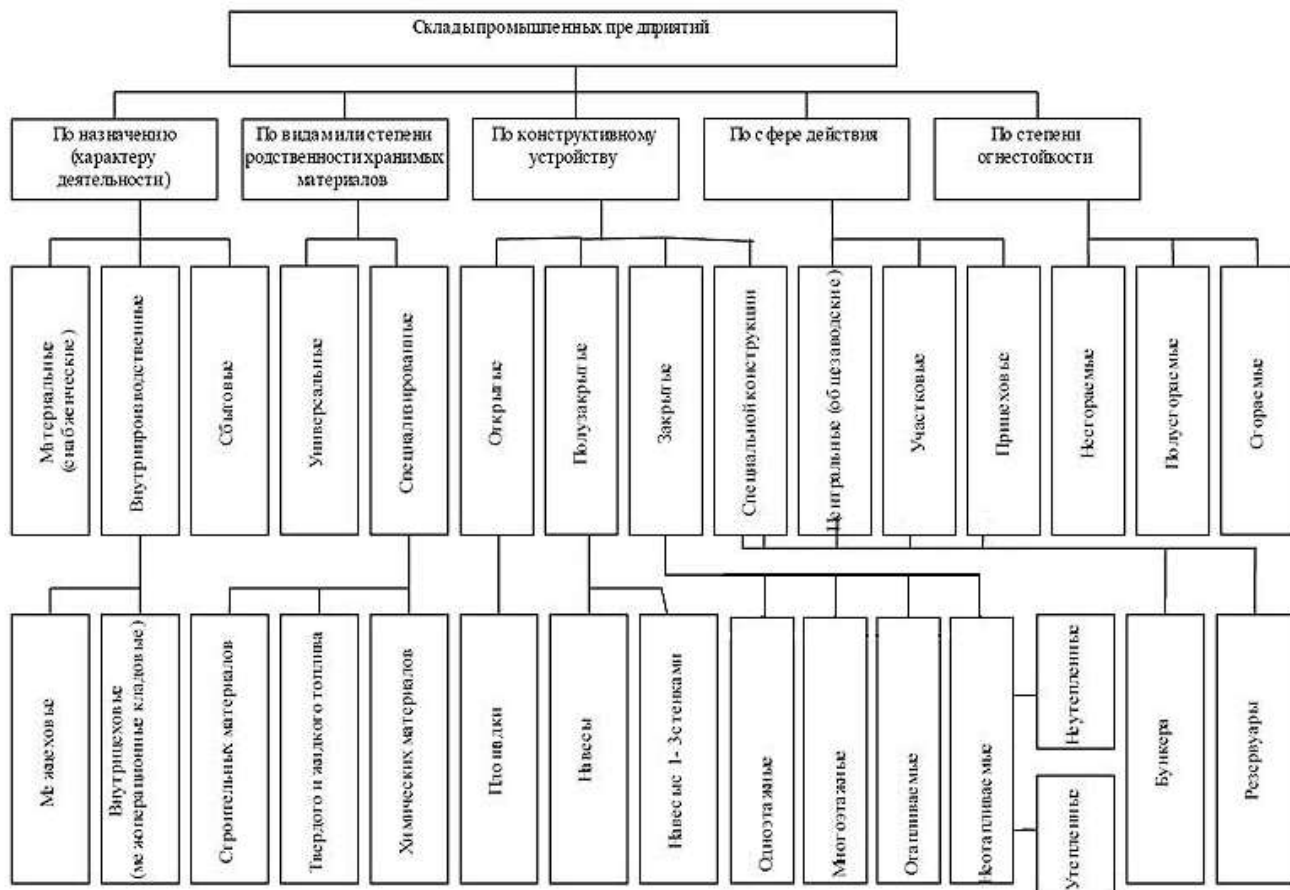


Рисунок 1.2 – Классификация складов по вредным веществам

Складирование ядов 2-ой группы на свалках вредных веществ требует их предварительной обработки, а именно, иммобилизации или нейтрализации этих веществ с целью их изоляции от окружающей среды. Лишь после этого возможна их укладка на наземных свалках для постоянного хранения.

Между свалками вредных веществ и специальными свалками имеется существенное различие, несмотря на то, что на них складироваются отходы особого характера. Это различие проявляется в технологии укладки и обработки отходов.

К специальным свалкам ядовитых веществ предъявляются повышенные требования по обеспечению безопасности. Здесь используются контейнеры из прочного железобетона или битумного бетона, а также применяется технология уплотнения поверхности свалки с целью минимизации объемов фильтрационных вод. На таких свалках ведется постоянная работа по ликвидации вредных веществ.

Ввиду того, что срок эксплуатации свалки прямо пропорционален степени уплотнения отходов, то использование специальных уплотняющих машин позволит увеличить срок службы полигона в 1,4-1,9 раза.

Утилизация твердых бытовых отходов является одной из основ нормального жизнеобеспечения городского хозяйства. Одним из основных способов, применяемых для ликвидации бытового мусора, является сооружение полигонов твердых бытовых отходов. Работа современного полигона твердых бытовых отходов тесно связана с использованием тракторной техники (рисунок 1.3), разработкой которой занимаются ведущие мировые производители.



Рисунок 1.3 – Работа спецтехники на свалке

Для повышения вместимости полигонов ТБО все более широкое применение получают специальные катки-уплотнители, технико-эксплуатационные показатели которых приведены в табл. Уплотнение отходов на полигонах происходит под воздействием нормальных контактных напряжений, возникающих на поверхности кулачков, и за счет бокового распора, обусловленного погружением кулачков в отходы.

Для этих целей применяются специализированные коммунальные машины, называемые компакторами или катками-уплотнителя. Они могут

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

смещать и разравнивать мусор в пределах выделенных площадей, а также разрушать и уплотнять его. Они предназначены для измельчения, распределения и уплотнения отходов на полигонах хранения отходов [3]

Компактор (compactor) – это самоходная машина с заменой пневмоколес железными вальцы с большими грунтозацепами, предназначенными для разрушения и уплотнения отходов материала и которая перемещает, разравнивает и уплотняет почву, захоранивает отходы или обеспечивает санитарию материалов в процессе своего движения (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Компактор фирмы Volvo

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Уплотняющим катком (landfill truck) называется самоходная колесная машина, имеющая движитель в виде утрамбовывающих катков (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Каток-уплотнитель фирмы Caterpillar

Стоит отметить, что спецтехника различных видов предназначена для разного типа отходов. Классификация уплотнителей для полигонов твердых бытовых отходов приведена на рисунке 1.6.

В соответствии со своим назначением машина должна сочетать в себе функции бульдозера, планировщика, измельчителя и уплотнителя отходов. Ходовая система предназначена не только для движения, но и для разрушения и уплотнения отходов материала, которая перемещает, разравнивает и уплотняет почву, производит захоронение отходов или обеспечивает санитарную обработку материалов в процессе своего движения [14].

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

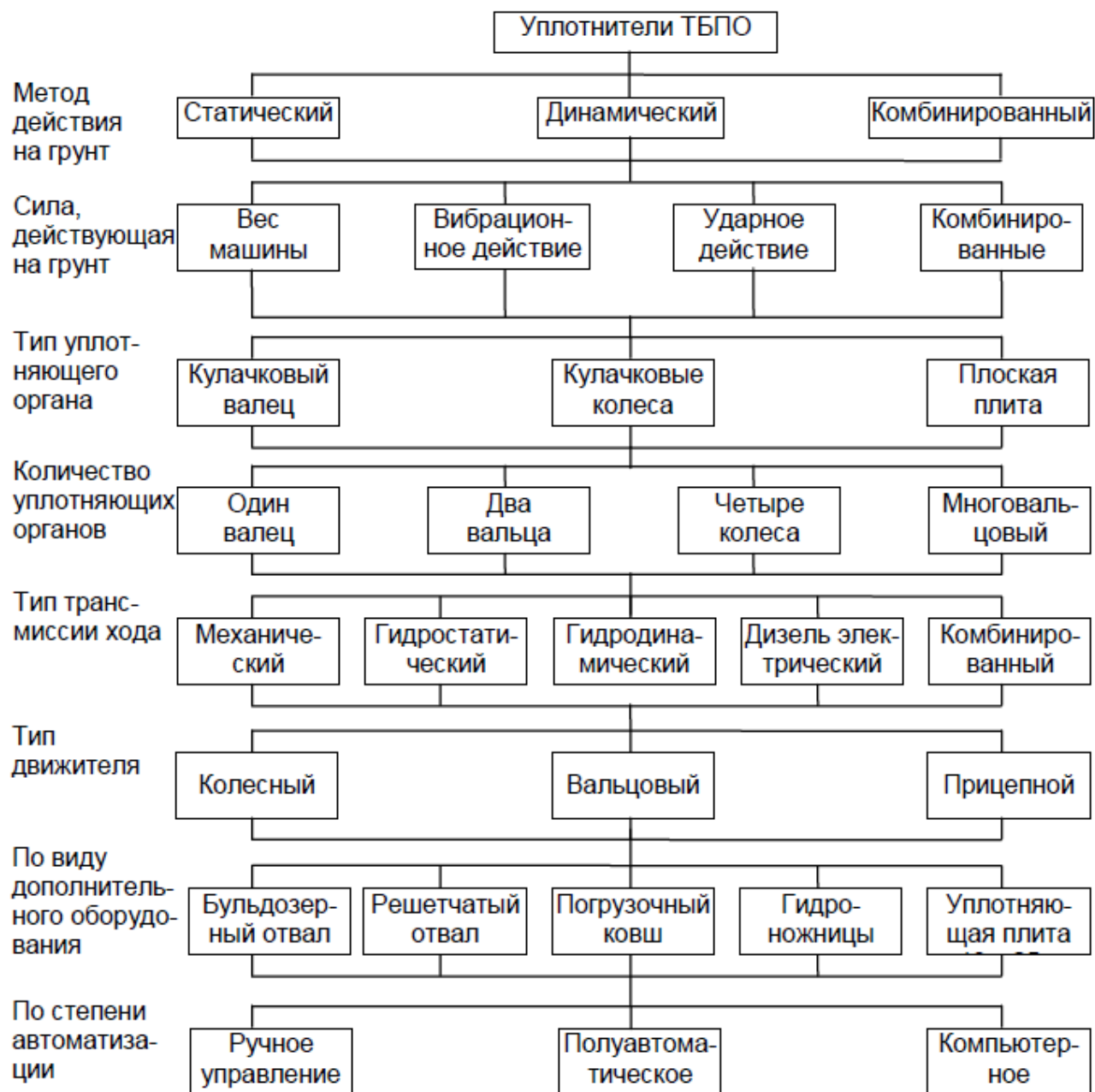


Рисунок 1.6 – Классификация техники для свалки

На катках-уплотнителях часто вместо пневматических колес устанавливают цельнометаллические кулачковые катки (рисунок 1.7). Они представляют собой колеса цилиндрической формы, сваренные из литых деталей. На цилиндрической поверхности обода колеса в четыре ряда в шахматном порядке расположены кулачки У-образной формы. Такая конструкция позволяет увеличить ширину полосы обработки и повысить устойчивость и проходимость устройства.

Уплотнение отходов происходит под воздействием нормальных контактных давлений, создаваемых на опорную поверхность. Сжатия отходов позволяет максимально вытеснить воздух из мусора, чтобы сделать плотность отходов максимальной, что позволяет сократить площадь, необходимую для их размещения.



Рисунок 1.7 – Каток с кулачковыми катками

Для очистки задних катков от отходов, застревающих между кулачками, предусматривается установка очистителей (скребков). Скребки монтируют между рядами кулачков. Очистка передних катков не требуется.

Если компакторы предназначены в первую очередь для разрушения отходов, и их контактное давление должно, для более эффективного измельчения, превышать предел прочности отходов, то кулачковые катки

уплотняют отходы и нормальное давления в контакте ограничивается пределом прочности грунта.

Процесс уплотнения отходов осуществляют следующим образом. При первых проходах, когда твердые бытовые отходы еще не уплотнены, кулачки полностью погружаются в отходы, а валец катка входит в контакт с отходами и уплотнение происходит по всей плоскости соприкосновения. При этом кулачки производят интенсивное разрушение и деформацию крупногабаритных составляющих отходов. При последующих проходах происходит увеличение поверхностной площади отходов, приводящее к утрате контакта между поверхностью вальца и отходами. При третьем и четвертом проходах катка уплотнение отходов осуществляется только кулачками, обеспечивая максимальную степень уплотнения.

Таким образом, при работе кулачковых катков уплотнение твердых бытовых отходов выполняется не сверху вниз, как при уплотнении гладкими вальцами, а снизу вверх, обеспечивая тем самым наиболее равномерное уплотнение отходов по всей толщине слоя. Учитывая этот факт, максимальное расчетное удельное давление следует определять после четвертого прохода катка по одному следу. Расчет максимального удельного давления может быть выполнен с учетом следующих требований: при четвертом проходе катка по одному следу кулачки погружаются в твердые бытовые отходы на всю высоту, а валец только касается поверхности уплотняемого слоя, не влияя на процесс уплотнения; в передаче отходами массы катка участвуют кулачки, находящиеся в непосредственном контакте с отходами.

Эффективная эксплуатация самоходных катков-уплотнителей обеспечивается только при регулярном, независимо от сезона года, послойном уплотнении отходов.

На некоторых катках предусмотрена возможность изменения их общей массы за счет установки балласта. С этой целью в торцевых стенках вальцов выполнены отверстия для загрузки балласта (песка). Кроме того, поскольку работа катков-уплотнителей связана не только с уплотнением отходов, но и с их

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

разравниванием (перемещением), для преодоления указанных сопротивлений они должны обладать достаточным тяговым усилием.

Бульдозерное оборудование отличается от отвала тем, что в своей верхней части имеет решетчатый козырек (рисунок 1.8) с ячейками размером 50х50 мм, исключающий попадание отходов за отвал и не снижающий обзорности с места водителя.



Рисунок 1.8 – Компактор «Бурлак» с специальным отвалом

Ввиду того, что срок эксплуатации свалки прямо пропорционален степени уплотнения отходов, то использование специальных уплотняющих машин позволит увеличить срок службы полигона в 1,4-1,9 раза.

Работа современных свалок тесно связана с использованием техники, способной разрушать и уплотнять твердые бытовые отходы. Иновационные тенденции машиностроения связаны с созданием перспективных специальных машин. Многие тракторные заводы и корпорации налаживают выпуск компакторов и катков-уплотнителей.

1.3 Производители уплотнителей отходов

Производством подобных машин занимаются ведущие мировые компании, производители коммунальной и строительной техники. Например, Bomag BC-670B, Bomag Compactor, Hanomag Compactor CL 66 D turbo (Германия), Stalowa Wola-Compactor 515K, Fadroma Compactor-L220C (Польша), Novostroj КТО-150 (Словакия).

Уплотнитель почвы фирмы Bomag (рисунок 1.9) отличается жесткой фиксацией ходовых колес, что делает возможным работу на крутых склонах.



Рисунок 1.9 – Компактор фирмы «BOMAG»

Из-за различных особенностей рельефа будущих полигонов это преимущество может стать решающим при выборе модели уплотнителя. Малые габариты и большая рабочая масса будут положительно сказываться на производительности там, где под хозяйственную часть свалки отводится минимальная территория, а дно котлована спроектировано под углом для сбора сточных вод[5].

Преимущества уплотнителей мусора Bomag, характеризуются:

- Большой износоустойчивостью;
- Сверхвысокой силой тяги ходовых колес;
- Мощностью толкания отвала;

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

— Хорошей маневренностью в условиях ограниченного пространства.

Машины Bomag имеют большую массу при относительно небольших габаритных размерах, что повышает плотность сжатия отходов и снижает риск их возгорания. Разработчики Bomag позаботились также и о максимальном комфорте оператора. Его кабина защищена экраном, который является частью отвала и необходим для защиты стекла от крупных частиц мусора. Рабочее место оборудовано системой вентиляции с угольной фильтрацией, что обеспечивает постоянный приток свежего воздуха [6].

Каток-уплотнитель фирмы TANA (Финляндия) предназначен для уплотнения мусора и отходов на полигонах твердых бытовых отходов (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Каток фирмы «TANA»

Фирма TANA производит катки-уплотнители с 1971 года. Каток «TANA» – первый специально построенный уплотнитель отходов на рынке. Единственный специализированный каток-уплотнитель со сплошными вальцами-барабанами на всю ширину катка. Серия TANA результат

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ					

долгосрочного совершенствования продукции и доказанные разрешения которые приносят замечательные преимущества к потребителю. Уникальная конструкция TANA со своими твиновскими барабанами, жесткой рамы и задавливающими зубьями стоят для доказанных прочных разрушений. Эта конструкция обеспечивает увеличение время машины. С упрощенным обслуживанием, хорошей проходимости, и более легким управлением и управлением машины, уплотнители серии TANA могли отрегулировать отход на местах захоронения отходов в экономически-эффективном пути, обеспечивающее более лучшую емкость уплотнения и ненужной обработки с более низкими производственными затратами.

Твердая рама обеспечивает оптимальное задавливаемое усилие. Этот уплотнитель TANA был построен вокруг твердой шарнирной рамы которая обеспечивает до 100 процентов большую задавливаемую силу на одиночном барабане, по сравнению к подобным четырех-колесным промышленным тракторам.

Преимущества катка «TANA»:

- Уменьшает нежелательное качание кабины;
- Отсутствие бесконтрольного смещения веса;
- Максимальное уплотнение;
- Очень простая конструкция и весьма работоспособная конструкция;
- Превосходная тяга [7].

Фирма Dунарас (Швеция) — один из мировых лидеров по производству и поставкам строительной и дорожной спецтехники, в частности, различного уплотнительного оборудования (основана в 1934 г.).

Головной офис Dунарас находится в Стокгольме. Фирма имеет 8 действующих заводов в Швеции, Германии, Франции, Бразилии, США и Китае. 16 точек сбыта продукции компании, расположенные в разных уголках мира, поставляют производимую Dунарас спецтехнику в 115 стран. В штате компании состоит около 2100 человек, включая специалистов по НИОКР и принятию решений.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Этот производитель имеет прочные позиции на глобальном рынке при том, что половина всех доходов компании приходится на европейский регион.

Дунарас предлагает своим клиентам широкий модельный ряд строительной и дорожной спецтехники. В ассортименте продукции компании имеется техника для тяжелого уплотнения (рисунок 1.11), асфальтирования и переработки отходов, уплотнения бетона, включая катки, силовые генераторы, осветительное оборудование и погружные насосы.



Рисунок 1.11 – Каток фирмы «DYNAPAC»

Помимо этого Дунарас выпускает также и легкую технику: виброплиты различных типов, трамбовочные машины, траншейные катки и т.д. [8].

Долгое время российские природоиспользователи не имели возможности применять такие машины из-за дороговизны зарубежной техники и отсутствия отечественных производителей. В настоящее время ряд российских предприятий налаживается выпуск специализированной техники.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Компактор БКК-1 для работы со свальным грунтом укомплектован специальным облегченным отвалом повышенной емкости. Сверху на отвале установлена решетка, увеличивающая объем отвала и позволяющая работать с большим количеством материала, что соответственно поднимает эффективность использования компактора.

Использование компактора БКК-1 при утилизации твердых бытовых и промышленных отходов (ТБПО) позволяет:

- Достигать равномерной усадки захороненной массы отходов за счет достаточного ее измельчения;
- Экономить объем размещения отходов на полигоне за счет правильного планирования;
- За счет равномерного уплотнения, использовать меньшее количество покрывных почв;
- Уменьшать риск возникновения пожаров и снизить опасность для окружающей среды;
- Максимально продлить срок службы полигонов ТБПО[9].

Фирма «РАСКАТ» – крупнейшее российское предприятие из города Рыбинска, выпускающее все виды дорожно-уплотнительной техники в нашей стране.

Уплотнитель «RV-21» – уникальная для российских производителей спецтехника (рисунок 1.13).

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

условиях умеренного климата, при этом нижнее значение температуры окружающего воздуха не должно быть менее -35°C .

Уплотнитель RV-21 представляет собой самоходную двух-вальцовую кулачковую машину с бульдозерным отвалом и шарнирно-сочлененными рамами с относительным углом поворота относительно продольной оси на угол 30° только в горизонтальной плоскости, что обеспечивает машине хорошую маневренность при работе в условиях полигона, а также достижение максимального дробящего усилия величиной более 20 МПа (200 кг/см²) на опорной плоскости вершины кулачка. Вертикальная ось вращения шарнира сочленения расположена на равном расстоянии от осей вальцов, что позволяет осуществлять движение вальцов при поворотах по одному следу.

В настоящее время фирма «Раскат» выпускает целую серию дорожно-уплотнительной техники различных тяговых классов: RV-18, RV-19, RV-20, RV-21, RV-25[10].

В выпускной квалификационной работе в качестве объекта исследований принят каток-уплотнитель RV-21 производства Рыбинского завода «Раскат».

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

1.4 Требования к безопасности уплотнителей мусора

В настоящее время большинство из действующих стандартов, определяющих требования к надежности, производительности и эффективности тракторных агрегатов, были отменены. Обязательными к применению, в соответствии с Федеральным Законом «О техническом регулировании», остались лишь стандарты обеспечивающие безопасность [11].

После вхождения России в Таможенный союз с Белоруссией и Казахстаном вступил в действие технический регламент [12], согласно которому обязательной сертификации подлежат защитные устройства всех тракторных агрегатов.

Производство кабин оператора спецтехники с использованием конструктивных элементов безопасности, отвечающих стандартам ROPS и FOPS на сегодняшний день является обязательным условием для сертификации спецтехники на допуск к работе в карьерах и открытой горной работе в условиях сложных и неоднородных грунтов.

Защитные устройства могут быть направлены на обеспечения активной и пассивной безопасности.

Активная безопасность – свойства тракторного агрегата, направленные на предотвращение дорожно-транспортных происшествий и снижение вероятности его возникновения (рисунок 1.14).

Пассивная безопасность – совокупность конструктивных и эксплуатационных особенностей спецтехники, направленных на упреждение или снижение тяжести дорожно-транспортного происшествия, повреждения специального средства вследствие опрокидывания или падения на него предметов.

Важнейшим параметрам, обеспечивающим пассивную безопасность относятся защитные устройства кабины:

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30



Рисунок 1.14 – Трактор без защиты ROPS

ROPS (roll over protective structure) – защита при опрокидывании, предназначенное для уменьшения риска нанесения повреждений оператору при условии применения ремней безопасности [13];

FOPS (falling-object protective structure) – защита от падающих предметов (рисунок 1.15);



Рисунок 1.15 – Защитный каркас оператора FOPS

OST – защита от проникновения сучьев и других элементов.

Требования сертификации определяются ГОСТ Р ИСО 3471-2009[13], где все критерии носят линейный и экспоненциальный характер в зависимости от массы.

Стандарты устанавливают точные требования к защитным устройствам кабины и методикам оценки соответствия этим требованиям в лабораториях, проводящих испытания с использованием статического нагружения представительного образца. Подобный подход не дает полную информацию о деформации конструкции, которую будет иметь место при реальном опрокидывании.

ГОСТ Р ИСО 3471-2009 применим к ROPS, устанавливаемым на следующих мобильных машинах, управляемых оператором в положении сидя, как это определено в ИСО 6165, и имеющих массу 700 кг и более:

- бульдозер;
- фронтальный погрузчик;
- экскаватор-погрузчик;
- карьерный самосвал;
- трубоукладчик;
- одноосный тягач (скрепер, землевоз с шарнирно-сочлененной рамой);
- грейдер;
- каток;
- траншейный экскаватор;
- уплотнитель мусора.

Пассивная Безопасность оператора достигается использованием следующих параметров:

- ремней безопасности;
- сминаемых элементов передней панели или производством их из мягких материалов;
- складывающейся в случае аварии рулевой колонки;
- травмобезопасного pedalного узла;

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

- нережущих стекол (использованием закалённого стекла, при разрушении фрагментирующегося на множество безопасных осколков);
- дуг безопасности и усиленных передние крышевых стоек;
- поперечных брусьев в дверях ТС;
- защитными каркасами, обеспечивающими увод двигателя и его элементов при лобовом столкновении под днище ТС.

Согласно стандартам защитные устройства ROPS, отвечающие за безопасность оператора уплотнителей мусора при опрокидывании машины, является обязательным условием для сертификации спецтехники на допуск к работе.

1.5 Классификация защитных кабин ROPS

Существует большое разнообразие конструктивных схем защитных устройств и их креплений к остову трактора. Однако, несмотря на большое многообразие, все принципиальные схемы защитных каркасов классифицируют:

- по конструктивному исполнению: встроенные и оконтуривающие (рисунок 1.16),

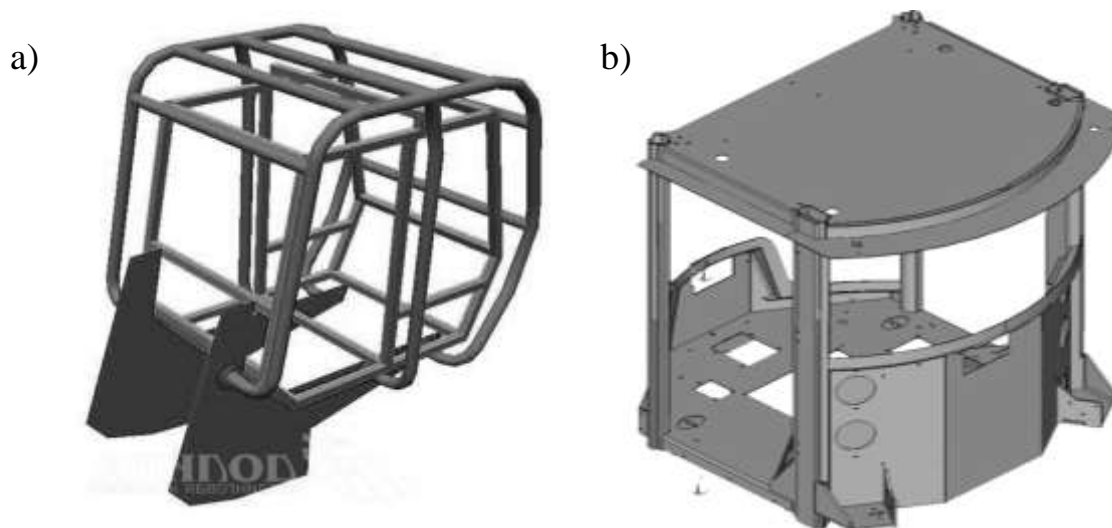


Рисунок 1.16 – Пример оконтуривающего (a) и встроенного (b) ROPS

- по числу вертикальных силовых элементов (двух-, четырех- и многостоечные).

1.6 Цель и задачи исследования

Объект исследования – защитное устройство кабины катка RV-21 при опрокидывании ROPS, предназначенное для уменьшения риска нанесения повреждений оператору при условии применения ремней безопасности.

Предмет исследования – энергетические характеристики защитной кабины катка RV-21 при оценке соответствия ее требованиям безопасности.

Цель исследования – проверка соответствия устройства защиты оператора при опрокидывании машины ROPS требованиям ГОСТ Р ИСО 3471-99.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

- изучение требований безопасности к защитным устройствам кабины от опрокидывания;
- проведение натурного эксперимента согласно ГОСТ Р ИСО 3471-99;
- проведение численного эксперимента методом конечных элементов.

1.7 Вывод по главе

По данному разделу можно сделать такой вывод, что развитие свалок очень пагубно влияет на окружающую среду и разрастается в очень ускоренном темпе и решение этого является вывоз в определенные места под названием полигоны, на которых уже работает специальная техника катки-уплотнители, компакторы и т.д. Спецтехника которая работает на полигонах проходит специальную сертификацию и проверку соответствия устройства защиты оператора при опрокидывании машины ROPS/FOPS требованиям ГОСТ. Также приведены требования к безопасности уплотнителей мусора и классификация защитных кабин.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

2 ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

При разработке критериев оценки безопасности тракторных кабин и методов их испытаний исходили из случаев травматизма, вида и характера деформации кабин при опрокидывании трактора, стремясь более точно имитировать реальные аварийные ситуации (причем наиболее типичные и опасные случаи) и нагрузки, которым подвергалась кабина.

Первоначально защитную кабину или каркас устанавливали на тракторе, который опрокидывали назад и набок. Трактор при этом выходил из строя. Такие испытания обходились довольно дорого. Воспроизвести их в идентичных условиях было трудно, поскольку действующие на кабину силы изменялись в широких пределах в зависимости от того, каким образом кабина ударялась о грунт.

На основании исследований, проведенных в Швеции и Великобритании в 50-х годах, разработаны методы лабораторных испытаний защитных кабин и каркасов. Кабины испытывали ударами маятникового груза массой 2 т (это соответствовало массе трактора того времени) сзади и сбоку и приложением статической вертикальной нагрузки к крыше. Чтобы определить уровень энергии ударов, действующих на кабину или каркас, сравнивали вид и характер деформаций, возникающих при имитации реального опрокидывания трактора и при воздействии маятникового груза[15].

В современной методике заменили ударные нагрузки статическим нагружением, имитирующим опрокидывание машины. При этом пластическая деформация защитной кабины должна погасить энергию удара не повредив пространства, отведенного для расположения оператора.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

2.1 Современная методика оценки соответствия

В настоящем стандарте ГОСТ Р ИСО 3471-2009[13] применены следующие термины с соответствующими определениями:

- *стенд (bedplate)* – основной несущий элемент, на котором закрепляется рама машины с целью проведения испытаний.

- *границная плоскость (boundary plane BP)* – плоскость, определяющая вертикальную проекцию спины, бока, колен оператора на DLV.

- *объем ограничения деформации (deflection-limiting volume DLV)* – фигура с прямоугольными очертаниями, по размерам приблизительно соответствующая антропометрическим данным оператора (мужчина высокого роста в положении сидя в обычной одежде и защитном шлеме) и определяющая предельно допустимую деформацию.

- *устройство защиты от опрокидывания ROPS (roll over protective structure)* – система конструктивных элементов, предназначенная для уменьшения риска нанесения повреждений оператору в случае опрокидывания управляемой им машины при условии применения ремней безопасности.

- *точка приложения нагрузки (load application point LAP)* – точка (или точка в определенном диапазоне) на структуре ROPS, к которой прикладывается сила испытательной нагрузки

- *деформация ROPS (deflection of ROPS)* – перемещение ROPS, монтажной системы и секции рамы, измеренное в точке приложения нагрузки (LAP) и исключающее эффект любого перемещения средств измерения.

- *конструктивный элемент ROPS (ROPS structural member)* – элемент, выполненный из металла, воспринимающий нагрузку или поглощающий энергию.

- *устройство распределения нагрузки (load distribution device LDD):* – устройство, используемое для предотвращения местного проникновения элементов ROPS в точке приложения нагрузки (LAP).

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

- *образец для испытаний (representative specimen)* – ROPS, монтажные узлы и рама машины (полностью или частично), используемые для испытаний, материалы для которых могут выбираться в соответствии со спецификацией изготовителя продукции.

- *рама машины (machine frame)* – основное металлическое шасси или главные несущие нагрузку элементы машины, которые выходят за пределы ее основной части и на которые непосредственно монтируется ROPS.

- *монтажные элементы (mounting system)* – все кронштейны, сварные узлы, соединения и другие устройства, которые обеспечивают крепеж ROPS к раме машины.

ГОСТ Р ИСО 3471-2009 устанавливает четкую последовательность проведения испытаний:

- боковое нагружение, имитирующее опрокидывание машины.
- вертикальное нагружение, имитирующее переворот на крышу;
- продольное нагружение проводится с наиболее близкой к оператору стороны.

ГОСТ четко регламентирует усилия, прикладываемые к защитной конструкции в зависимости от массы машины (таблица 2.1). В массу m не входит незакрепленный груз, который может отделиться от машины во время опрокидывания.

Согласно требованиям, оценка соответствия защитного устройства должно проводиться при монтаже его на раме машины в условиях предполагаемой эксплуатации. При оценке соответствия ROPS требованиям безопасности защитная конструкция должна крепиться аналогично тому, как она крепится на машине.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

Таблица 2.1 – Зависимости для усилия и энергии при оценке соответствия уплотнителей мусора

Вид испытаний	Параметр	Зависимость
<i>Масса катка $m=700...10000$ (кг)</i>		
Боковое нагружение	Усилие (Н)	5m
	Энергия (Дж)	$9500(m/10000)^{1,25}$
Вертикальное нагружение	Усилие (Н)	19,6m
Продольное нагружение	Усилие (Н)	4m
<i>Масса катка $m=10001...53780$ (кг)</i>		
Боковое нагружение	Усилие (Н)	$50000(m/10000)^{1,2}$
	Энергия (Дж)	$9500(m/10000)^{1,25}$
Вертикальное нагружение	Усилие (Н)	19,6m
Продольное нагружение	Усилие (Н)	$40000(m/10000)^{1,2}$
<i>Масса катка $m>53780$ (кг)</i>		
Боковое нагружение	Усилие (Н)	7m
	Энергия (Дж)	4.45m
Вертикальное нагружение	Усилие (Н)	19,6m
Продольное нагружение	Усилие (Н)	5,6m

Допускается проводить испытания на стенде. Объект испытаний должен быть смонтирован на стенде таким образом, чтобы жесткость конструкции была эквивалентна жесткости монтажа на комплектной раме машины. Все съемные окна, панели, двери и другие ненесущие элементы следует демонтировать, чтобы исключить их воздействие на результаты испытаний. Кабина, не интегрированная с ROPS, в стенд не включается.

Рама машины и предназначенный для испытаний ROPS образуют единую конструкцию, включающую в себя те узлы рамы, которые воспринимают энергию опрокидывания машины. Если отсутствует полнокомплектная рама машины для испытаний ROPS, возможно использование неполной рамы. Эта неполная рама должна быть как можно более приближенной к оригиналу с точки зрения прочности и жесткости.

Для неполной рамы машины или ее точной копии требуется проверка на жесткость и прочность рамы машины, чтобы быть уверенным, что она способна воспринимать в процессе испытаний машины энергию, проходящую через ROPS без разрушения. Оценка жесткости и прочности рамы машины должна выполняться при каждом испытании, когда используется неполная рама или копия рамы. Копия этой оценки должна храниться у изготовителя.

Для шарнирно-сочлененных машин (рисунок 2.1), если при испытаниях используют обе полу-рамы, шарнир следует заблокировать так, чтобы они располагались по прямой линии. Если при испытаниях используют только ту полураму, к которой крепится ROPS, то крепления располагают на месте сочленения или вблизи него и опоры оси или крайнем конце рамы.

Приспособления должны обеспечивать надежное крепление представительного образца к платформе стенда и реализовать требуемую боковую, вертикальную и продольную нагрузку в соответствии с требованиями таблицы 1 [17].

Объект испытаний должен крепиться на стенде таким образом, чтобы элементы крепления системы к стенду подверглись минимальной деформации в процессе испытаний. Объект испытаний не должен иметь дополнительной опоры на стенде, кроме предусмотренной первоначальным креплением.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

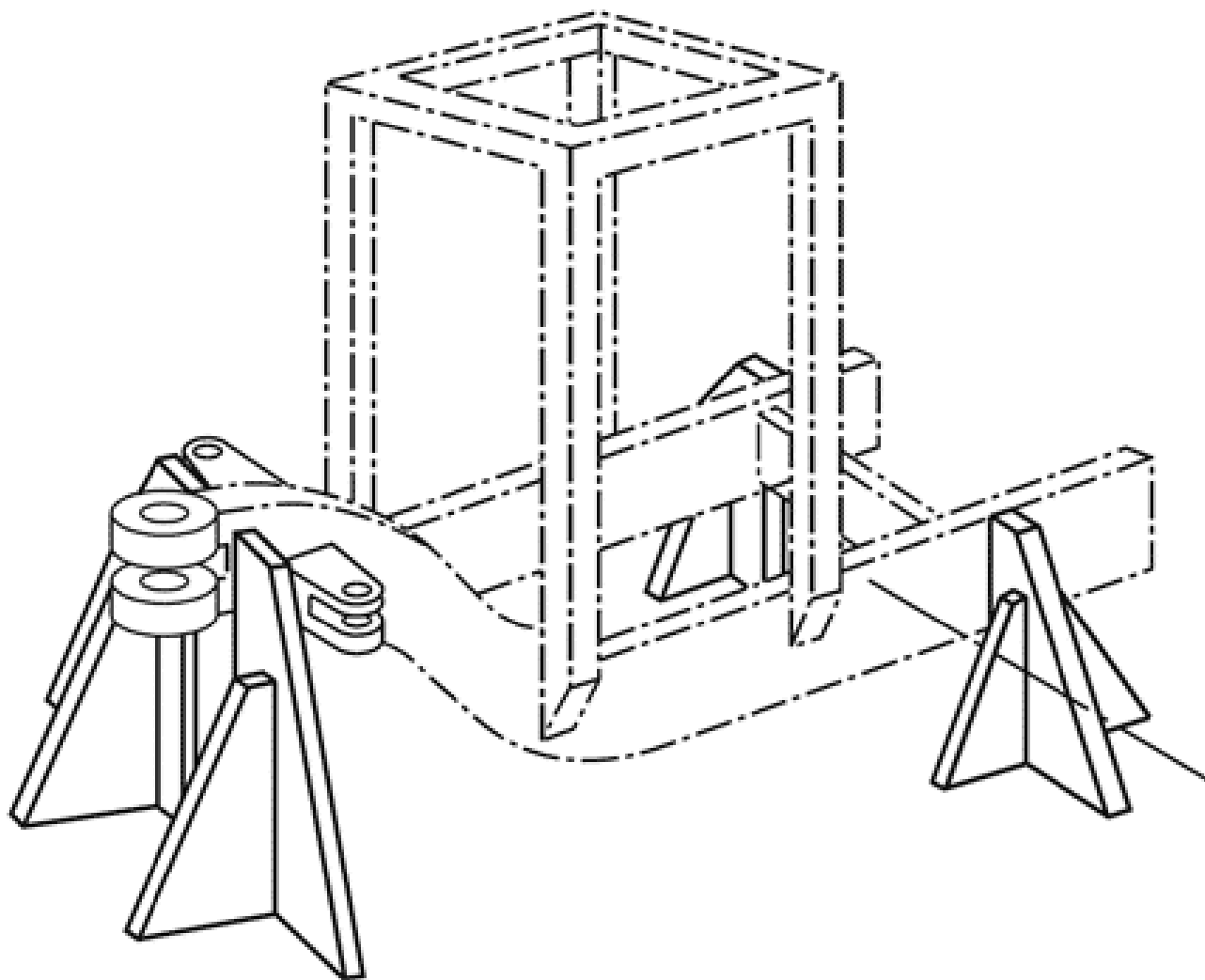


Рисунок 2.1 – Крепление на стенде шарнирно-сочлененной полу-рамы

Монтажные приспособления не должны препятствовать деформации рамы машины в зоне, где смонтировано ROPS. Это делается для того, чтобы энергия воспринималась только объектом испытаний, а не монтажными приспособлениями.

Согласно требованиям, оценка соответствия защитного устройства ROPS должна проводиться только на основе результатов натурального эксперимента.

									Лист
									41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ				

2.2 Выводы по главе

Согласно требованиям безопасности все защитные устройства ROPS должны раз в пять лет проходить проверку на соответствие путем проведения натуральных испытаний, имитирующих их нагружение при опрокидывании машины. Значения требуемых усилий и величина энергии деформации являются зависимостью от массы машины.

Каток-уплотнитель RV-21 фирмы «РАСКАТ» имеет массу $m = 21000$ кг.

Тогда, согласно данным ГОСТ (таблица 2.1) при боковом нагружении к защитной конструкции ROPS необходимо приложить усилие:

$$F_y = 50000(m/10000)^{1,2} = 121\ 796\ \text{Н} \quad (2.1)$$

При этом энергия деформации защитной конструкции ROPS должна составить не менее:

$$U = 9500(m/10000)^{1,25} = 24\ 015\ \text{Дж} \quad (2.2)$$

Величина вертикальной силы должна быть равна:

$$F_z = 19,61m = 411\ 810\ \text{Н} \quad (2.3)$$

Продольное усилие составляет по ГОСТ:

$$F_x = 40\ 000(m/10000)^{1,2} = 97\ 438\ \text{Н}. \quad (2.4)$$

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

3 НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КАБИНЫ

3.1 Описание испытательного стенда

Эксперимент проводился в Уральском испытательном центре НАТИ, имеющий специальный испытательный стенд (bedplate). Стенд выполнен в виде силовой рамы, установленной на железобетонном основании (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Испытательный стенд

										Лист
										43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ					

Внутри стенда устанавливался объект испытаний. Нагружение осуществлялось посредством вертикального и горизонтального гидроцилиндра. Гидравлическая система стенда обеспечивает максимальное усилие 2200 кН, что позволяет испытывать защитные кабины тракторов общей массой до 110 тонн.

В процессе испытаний проводился постоянный контроль нагрузки и деформации конструкции. Усилие определялось посредством манометров, измеряющих давление в обеих полостях гидроцилиндра (погрешность от минус 5% до плюс 5%). Деформация конструкции замерялась непосредственно по ходу гидроцилиндра с использованием измерительной линейной шкалы с ценой деления 1 мм и погрешностью от минус 0,5 мм до 0,5 мм (рисунок 3.2).

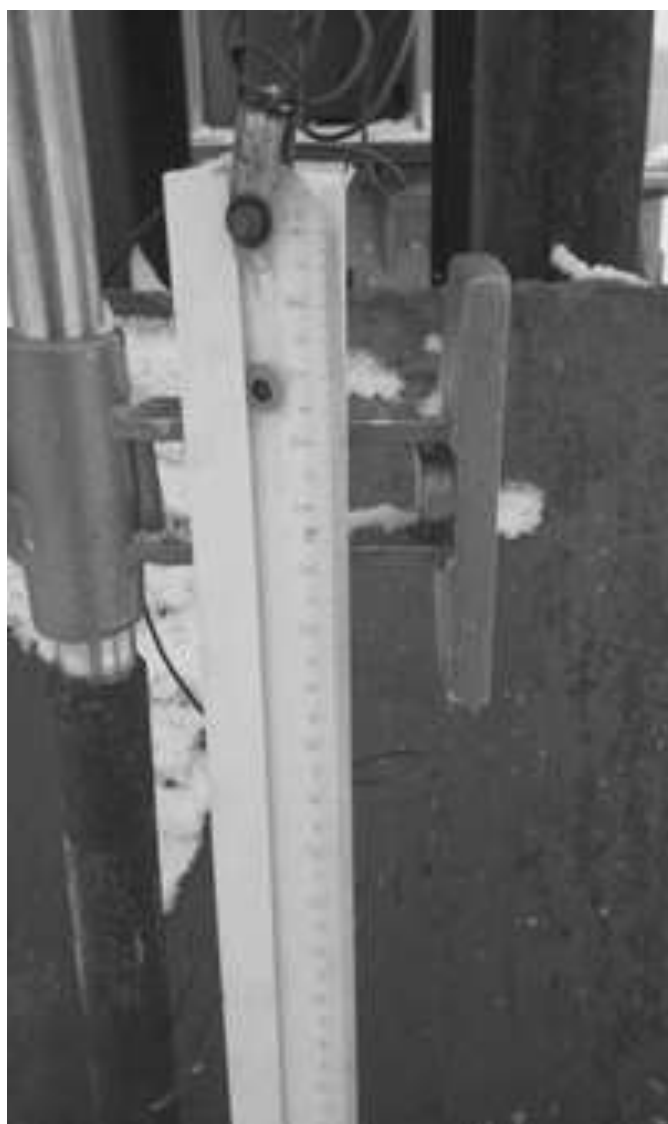


Рисунок 3.2 – Экспериментальный замер перемещений

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Системы, используемые для измерения массы, силы и отклонения должны соответствовать ИСО 9248, за исключением того, что погрешность измерения силы и отклонения должна быть в пределах от минус 5% до плюс 5% их максимальных значений.

Для учета имитации жесткости монтажа конструкции на раме трактора защитное устройство ROPS устанавливалось на корпусе бортовых фрикционов бульдозера и закреплялось соответственно реальной установке на тракторе. Внутри испытуемого защитного устройства устанавливался манекен объема ограничения деформации (DLV), имитирующий положение водителя.

Для кабины катка RV-21 фирмы «Раскат» положение DLV определялось координатами тоски Sip:

Z=550 мм вверх от пола кабины;

X=48мм вперед от задних дверных стоек;

У = 0 по продольной оси симметрии машины.

3.2 Боковое нагружение

Боковая нагрузка прикладывалась по оси верхнего поперечного элемента защитного устройства ROPS с правой стороны по ходу движения машины (рисунок 3.3).

Скорость приложения бокового усилия составила 4 мм/с, что позволило считать нагружение статическим. Нагружение защитного устройства производилось ступенчато с шагом, соответствующим деформации 10 мм.

В процессе нагружения замерялось давление в штоковой $\rho_{ш}$ и поршневой $\rho_{п}$ полости. Погрешность замера составляет ± 2 кПа. Развиваемое гидроцилиндром боковое усилие вычислялось по формуле:

$$F_y = \rho_n S_n - \rho_{ш} S_{ш}, \quad (3.1)$$

где $S_n = \pi D^2/4 = 78137$ мм² – площадь поперечного сечения поршня гидроцилиндра; $D = 317$ мм – диаметр поршня;

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

$S_{ш} = \pi d^2/4 = 15828$ мм² – площадь поперечного сечения штока гидроцилиндра; $d = 142$ мм – диаметр штока.



Рисунок 3.3 – До приложения боковой нагрузки (вид спереди)

Воздействие боковой нагрузки продолжалось до тех пор, пока значения силы не достигли требуемого по ГОСТ значения $F_y = 121\,796$ Н (2.1) (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – При максимальной боковой нагрузке (вид спереди)

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

Боковое нагружение проводилось пошагово с замером усилия через каждые 10 мм. Результаты замеров сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3,1 – Экспериментальные значения боковых усилий F_y на каждом шаге перемещения Δ

Δ , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
F_y , кН	3,63	6,25	14,14	25,2	17,33	33,1	48,2	71,74	83,26	90,68
Δ , мм	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
F_y , кН	98,5	100,2	105,7	109,6	109,6	98,0	104,0	106,0	113,5	120,0
Δ , мм	210	220	230	240	250	260	270	280	290	
F_y , кН	121,5	125,2	125,9	125,9	121,0	124,1	124,0	119,1	117,3	

По результатам замеров (таблица 3.1) был построен график зависимости бокового усилия F_y от деформации Δ точки приложения нагрузки (рисунок 3.5).

F_y , (Н)

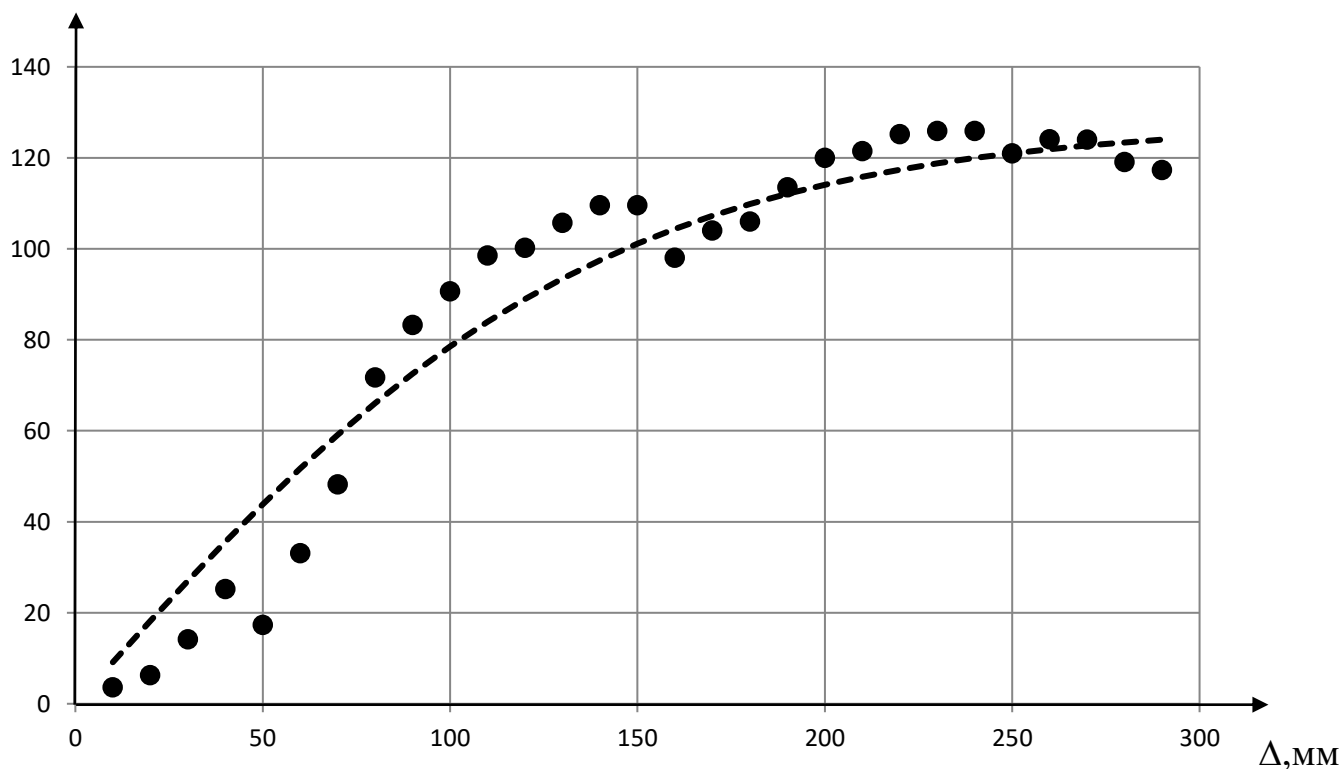


Рисунок 3.5 – Экспериментальная зависимость боковой силы от перемещения

• • - эксперимент, - - - - трендовая кривая $F_y = 128 \text{ th} (\Delta/140)$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

47

Зависимость $F_y(\Delta)$ имеет нелинейный характер, что соответствует наличию пластических деформаций.

Для исключения погрешности эксперимента замеренные данные аппроксимированы линией тренда $F_y(\Delta)$. По критерию наименьшего числа эмпирических коэффициентов выбрана зависимость $F_y(\Delta)$ вида:

$$F_y = F_{y\max} \operatorname{th}\left(\frac{\Delta}{b}\right), \quad (3.2)$$

где $F_{y\max}=128$ кН – максимальное значение усилия,

th – гиперболический тангенс,

b – эмпирический параметр.

Коэффициент корреляции тренда вычисляется:

$$R = \frac{\sum (F_{yiэ} - M_\varepsilon)(F_{yit} - M_t)}{\sqrt{\sum (F_{yiэ} - M_\varepsilon)^2 \sum (F_{yit} - M_t)^2}}, \quad (3.3)$$

где $F_{yiэ}, F_{yit}$ – экспериментальные и трендовые текущие значения силы на i перемещения;

$M_\varepsilon=88,2$ и $M_t=87,9$ – экспериментальное и трендовое значение математического ожидания.

Математическое ожидание (среднее значение выборки) равно:

$$M = \frac{\sum F_{yi}}{n}, \quad (3.4)$$

где $n=29$ – число точек замера (табл.???)

При значении $b = 140$ коэффициент корреляции равен $R = 0,95$, что говорит о малой погрешности проведенных замеров и хорошем соответствии линии тренда экспериментальным значениям.

Среднее относительное отклонение (3.4) экспериментальных значений от тренда равно:

$$\sigma_o = \sum \frac{F_{yiэ} - F_{yit}}{F_{yiэ}} 100\% = 4,5\%. \quad (3.5)$$

Наибольшие расхождения наблюдаются в зоне малых значений нагрузки.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Поглощенная системой ROPS энергия считалась как площадь под кривой $F_y(\Delta)$:

$$U = 0,5(\Delta_1 F_{y1}) + 0,5(\Delta_2 - \Delta_1)(F_1 + F_2) + \dots + 0,5(\Delta_n - \Delta_{n-1})(F_{n-1} + F_n), \quad (3.6)$$

где F_{yi} , Δ_i – сила и деформация на i шаге нагружения.

Значения поглощенной энергии деформации сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные значения поглощенной энергии U на каждом шаге перемещения Δ

Δ , мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U , Дж	18	67	169	366	579	831	1237	1837	2612	3482
Δ , мм	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
U , Дж	4428	5421	6451	7527	8623	9661	1067	1172	1281	1398
Δ , мм	210	220	230	240	250	260	270	280	290	
U , Дж	1519	1642	1768	1894	2017	2140	2264	2385	2504	

Согласно данным таблицы 3.2 видно, что при перемещении $\Delta=290$ мм поглощенная энергия $U=25040$ Дж, что выполняет требования ГОСТ $U \geq 24015$ Дж.

После снятия нагрузки невооруженным глазом видны остаточные деформации (рисунок 3.6), что подтверждает работу защитной конструкции в пластической области[18].



. Рисунок 3.6 – После снятия боковой нагрузки (вид сзади)

Требуемые уровни боковой силы и энергии деформации были достигнуты без проникновения элементов конструкции ROPS в зону DLV, что позволяет продолжить натурные испытания защитной кабины катка RV-21.

3.3 Вертикальное нагружение

После снятия боковой нагрузки на деформируемую конструкцию ROPS прикладывалась статическая вертикальная нагрузка F_z . Согласно ГОСТ минимальное значение вертикальной нагрузки равно (2.3)

$$F_z = 411810 \text{ Н.}$$

Экспериментальное значение вертикальной нагрузки $F_z = 420 \text{ кН}$. Нагрузка распределялась по всей ширине верхней части системы ROPS с

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

помощью переходного элемента (LDD) (рисунок 3.7) и длилось 5 минут (рисунок 3.8).



Рисунок 3.7 – До приложения вертикальной нагрузки



Рисунок 3.8 – При максимальной вертикальной нагрузке

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

51

Требуемый уровень вертикальной нагрузки был выдержан конструкцией ROPS. Проникновения элементов ROPS в зону DLV не наблюдалось, что позволяет продолжить испытания.

3.4 Продольное нагружение

После снятия вертикальной нагрузки к верхним конструктивным элементам ROPS прикладывалась продольная нагрузка F_x . Продольная нагрузка прикладывалась сзади в месте наибольшей близости к расположению водителя. Направление нагрузки горизонтально и параллельно продольной оси машины (рисунок 3.9 и 3.10).



Рисунок 3.9 – До приложения продольной нагрузки сзади

Нагружение продолжалось до тех пор, пока величина силы не превысила минимально требуемый по ГОСТ уровень $F_x = 97\,438\text{ Н}$.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

В процессе всего эксперимента защитного устройства ROPS ремонт, исправление деформаций и приведение конструкции в порядок не допускались. Постоянно проводился контроль, чтобы элементы конструкции не попали в зону нахождения оператора (DLV).



Рисунок 3.10 – При максимальной продольной нагрузке

При испытаниях значение продольной нагрузки составило $F_x = 102\ 000$ Н, что превысило требуемый по ГОСТ уровень. Проникновение элементов конструкции ROPS в зону DLV не наблюдалось.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

3.5 Выводы по главе

Согласно протоколу №11/17 от 17 ноября 2017 года натурных испытаний защитного устройства ROPS кабины катка PV-21 были достигнуты требуемые ГОСТ показатели сил и энергии. Система ROPS выдержала все виды нагружения (боковое, вертикальное и продольное). Полученные конструкцией пластические деформации не нарушили зону DLV.

При испытаниях были достигнуты и превышены следующие уровни нагрузки и энергии без проникновения элементов конструкции ROPS в зону DLV:

- боковое нагружение сила $F_y = 125\,900$ Н (по ГОСТ $F_y = 121\,796$ Н);
энергия $U = 25\,050$ Дж (по ГОСТ $U = 24\,015$ Дж);
максимальное перемещение составило 290 мм;
- вертикальное нагружение $F_z = 420\,000$ Н (по ГОСТ $F_z = 411\,810$ Н);
- продольное нагружение $F_x = 102\,000$ Н (по ГОСТ $F_x = 97\,438$ Н).

В результате сделано заключение о соответствии конструкции ROPS требования ГОСТ по безопасности кабины катка PV-21 при опрокидывании. Выдан сертификат соответствия, который действителен для кабин всех модификаций катков фирмы «Раскат» не превышающих массу 21 тонну: RV-18; RV-19; RV-20 и RV-21.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

4 ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ КАБИНЫ RV-21

Несмотря на требования ГОСТ об оценке соответствия защитного устройства ROPS только на основе лабораторных испытаний все чаще предпринимаются попытки по замене натурального эксперимента численным.

Многие достаточно солидные фирмы заменяют натурные испытания компьютерным имитационным моделированием. Порой натурный эксперимент просто невозможен или нецелесообразен. Например, экспериментальная оценка новых видов самолетов или элементов космических станций может вызвать гибель людей. Так в Росатоме разработали программу 3-D моделирования, позволяющую отказаться от ряда натурных испытаний в ходе создания новых ракет и самолетов с полноценной заменой их расчетами. На фирме Toyota предложены методы математического имитационного моделирования, позволяющие в будущем заменить собой дорогостоящие краш-тесты автомобиля.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие информационных технологий, которое способствует расширению области применения прикладных расчетов. Решение различных физических задач при проектировании несущих конструкций в строительной отрасли давно происходит с помощью численных методов. Численные методы широко используются при решении задач сплошной среды в двигателестроении. Для оптимизации металлоемкости, модернизации существующих и проектирования новых кабин, в инженерной практике широко применяются расчетные методы.

Численный эксперимент позволяет выявить слабые места конструкции, провести при необходимости ее доработку и усиление, а также оценить возможность замены натурных экспериментов защитной системы трактора ROPS имитационным моделированием.

4.1 Выбор программного обеспечения

Среди систем автоматизированного проектирования важное место занимают комплексы метода конечных элементов (МКЭ), позволяющие

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

проводить имитационное моделирование работы исследуемой конструкции на основе подробного описания ее геометрии, физики моделируемых процессов, свойств применяемых материалов, эксплуатационных характеристик и иных исходных данных, указываемых пользователем [19].

Метод конечных элементов – это метод численного решения физических задач. Суть метода заключается в том, что исследуемая конструкция, разбивается на некоторое число малых, но конечных по размерам элементов, а кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области. Таким образом, в основе МКЭ лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций [20].

В качестве основных неизвестных в МКЭ могут приниматься величины разного типа: кинематические (перемещения или деформации), статические (внутренние силы или напряжения) или смешанные (кинематические и статические) параметры. В зависимости от выбора неизвестных различают три формы МКЭ: метод перемещений, метод сил и смешанный метод.

Круг задач, решаемых современными комплексами программ на базе МКЭ, охватывает почти все сферы инженерных расчетов: прочность, колебания, устойчивость, динамика, акустика, гидродинамика, аэродинамика и т.д. Представить полный список специализаций конечно-элементных программ, как и полный список всех пакетов программ конечно-элементного анализа, фактически нереально. Однако провести краткий обзор наиболее распространенных конечно-элементных программ не только возможно, но и необходимо [21].

Расчет конструкций на статические нагрузки может производиться с учетом физической и геометрической нелинейности, температурных полей, взаимодействия с другими средами (например, с жидкостью). Производится расчет критических нагрузок, при которых конструкция или ее элементы теряют устойчивость, поведения конструкции после потери устойчивости. МКЭ позволяет также определить нагрузки, при которых происходит

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

разрушение конструкции. Учитываются такие свойства материала как анизотропность, нелинейная упругость, пластичность, текучесть. Учитываются виды геометрической нелинейности: большие деформации и большие перемещения.

В настоящее время разработаны сотни программных комплексов, предназначенных для решения самых разнообразных задач из области механики деформируемого твердого тела, гидродинамики, акустики, электротехники и т.д. Среди комплексов МКЭ можно указать такие продукты, как ANSYS, ABAQUS, ADINA, COMSOL, NASTRAN, ADAMS, DYTRAN, MARC и другие.

Все конечно-элементные программы можно условно разбить на две основные группы: специального и общего назначения.

Программы специального назначения, как правило, разрабатываются для решения специализированных задач в необходимой исследуемой области. Это объясняется стремлением авторов создать более простой и компактный инструмент для работы, но существенно сужает их возможности. Кроме того имеется большое количество программных модулей для конечно-элементных расчётов, некоторые из них включены в состав более крупных программных продуктов.

ADAMS – *система виртуального моделирования машин и механизмов*. В программном пакете ADAMS моделируются условия работы машин и механизмов. Широкие возможности анимация и высокая надёжность пакета ADAMS позволяют проводить кинематический анализ множества сложных конструкций машин и механизмов. В нем разработаны готовые модули для имитации упругих пневматических шин, гидросистем, двигателя внутреннего сгорания, железнодорожного подвижного состава и авиатехники. Пакет позволяет проводить расчёт частот и форм собственных колебаний; анализ усталости и долговечности конструкции; моделирование и анализ вибрации машины [22].

DYTRAN – *система анализа нелинейных быстропротекающих динамических процессов*. Система DYTRAN очень эффективно применяется в

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

автомобильной, аэрокосмической и оборонной промышленности. С ее помощью можно решать задачи взаимодействия автомобиля с препятствием и пассажира с подушками безопасности в момент ее заполнения воздухом при катастрофе, столкновения птиц с самолетными конструкциями, столкновение и посадка судов на мель, взрывы в ограниченном пространстве, удар снаряда о преграду и ее пробивание, попадание метеорита в обшивку космического аппарата, штамповка металла, поведение жидкости в не полностью заполненных емкостях [23].

MARC – система комплексного нелинейного анализа конструкций, решение сложных задач термопрочности, моделирование технологических процессов. MARC эффективно применяется для решения задач теплопередачи, задачи анализа поведения резиновых уплотнений, анализа строительных сооружений с учетом свойств грунта, моделирования контакта зубчатых зацеплений, анализ термических напряжений, анализ жидких сред, моделирование гидродинамического подшипника, акустический анализ, электростатический анализ, магнитостатический анализ, анализ электромагнитного поля [24].

ADINA – система для высоконелинейного динамического анализа на основе МКЭ, позволяющая решать задачи теплопереноса в твёрдых телах и конструкциях; рассчитывать течения сжимаемой и несжимаемой жидкости, использующую конечно-объёмную и конечно-элементную дискретизацию; проводить мультифизические и электростатические симуляции. Пре- и постпроцессорный модуль позволяет создавать и редактировать геометрические и конечно-элементные модели и осуществлять визуализацию результатов расчёта.

Все программы специального назначения изначально разрабатывались, и следовательно заточены, под решение конкретных частных задач. В нашем случае (при оценке работоспособности и надежности защитного устройства кабины трактора FOPS-ROPS) необходимо использование программ общего назначения.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

и нелинейных переходных процессов, анализ сложного контактного взаимодействия, расчёт критических частот и вибраций роторных машин, исследование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях [27]. В системе NASTRAN возможно моделирование практически всех типов материалов, включая композитные.

ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа, используется в инженерных расчётах для решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела, и механики конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики. – универсальный конечно-элементный пакет. Система имеет свой собственный язык программирования APDL. Достоинством программы является ее универсальность, т.е. возможность использования одной и той же модели для решения различных задач. ANSYS позволяет учитывать при расчёте ориентацию волокон в слоях в случае неоднородности и анизотропии материала[28]. Реальным достоинством этой системы является наиболее полная документация и система помощи, что позволяет, имея хорошие базовые знания механики, использовать программу без обращения в службу поддержки пользователей.

У каждой программы есть свои сильные и слабые стороны при расчете конкретной конструкции. Основными критериями при выборе программного продукта можно считать следующие факторы:

1. тип решаемой задачи;
2. требование к компьютерному обеспечению;
3. коммерческая стоимость и доступность;
4. наличие понятной (русскоязычной) документации;
5. распространённость и признанность;
6. совместимость с другими инженерными программными продуктами (AutoCAD, Mechanical Desktop, Pro-Engineer, SolidWorks и др.).

Бесспорным лидером на рынке конечно-элементных программ является пакет ANSYS. Основными преимуществами программного продукта ANSYS являются широкие возможности, высокая точность вычислительных исследований, большой выбор решаемых физических задач, возможность совмещённого анализа исследований, препроцессор для построения различной геометрии и сетки с выбором типа конечного элемента, а также наличие в нашем распоряжении лицензионной версии. Поэтому для моделирования поведения кабины катка RV-21 был выбран пакет ANSYS.

4.2 Методика расчетов методом конечных элементов

Преимущества МКЭ перед другими численными способами:

- исследуемые объекты могут иметь различную физическую природу (твёрдые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды);
- конечные элементы, на которые разбивается конструкция, могут быть различной формы и размеров;
- свойства исследуемого объекта могут быть однородными и неоднородными, изотропными и анизотропными, линейными и нелинейными;
- число решаемых задач (стационарных, нестационарных, контактных) на одной и той же сетке конечных элементов может быть несколько .

Широкое развитие МКЭ обусловлено тремя факторами:

- наличием высокопроизводительной вычислительной техники;
- разработкой математических моделей исследуемых явлений, адекватных реальным процессам с достаточной степенью точности;
- особенностями самого метода .

Для МКЭ характерны особенности, которые следует учитывать при выборе и разработке программы расчета. Такими особенностями являются объемы исходных данных, промежуточных и окончательных результатов расчета. Поэтому расчет по МКЭ состоит из трех основных этапов, каждый из которых является самостоятельной задачей :

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

- разработка конечно-элементной схемы;
- проведение расчета;
- обработка результатов расчета.

Первый этап включает создание конечно-элементной расчетной модели на основе инженерной интуиции о поведении конструкции при воздействии на нее предполагаемых нагрузок и подготовку исходных данных о величине, направлению и месту воздействия нагрузок, а также способу закрепления конструкции.

Этап второй – проведение расчета, осуществляется расчетным блоком, состоящим из ряда программных модулей, каждый из которых выполняется на определенном шаге алгоритма:

- ввод исходных данных;
- вычисление матриц жесткостей конечных элементов;
- формирование глобального вектора нагрузок;
- решение системы линейных алгебраических уравнений;
- вычисление перемещений, деформаций и напряжений в точках конечных элементах.

Часто на различных шагах расчетного блока (в результате промежуточных вычислений) производится диагностика ошибок, позволяющая прервать вычисления в случае их ошибочности.

Третий этап подразумевает анализ результатов расчета, который опирается на диагностику точности полученного решения [29].

4.3 Построение 3D модели кабины RV-21

На основе конструкторской документации (рисунки 4.1-4.4) в конструкторском пакете SolidWorks была построена 3D модель.

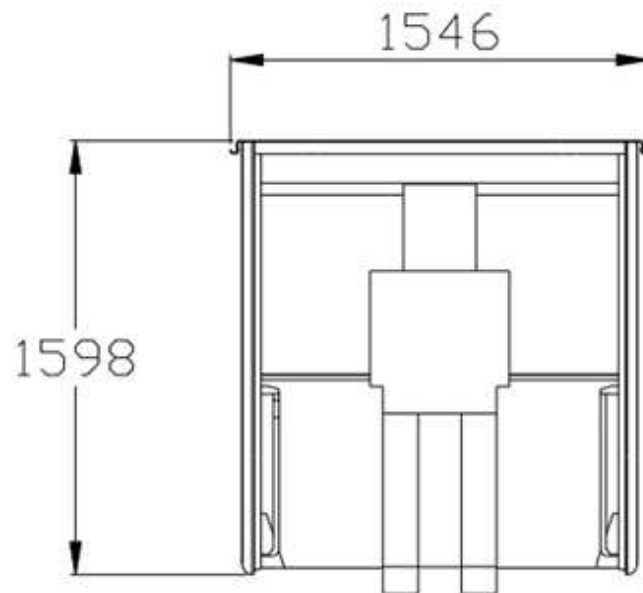


Рисунок 4.1 – Габаритные размеры кабины (вид спереди)

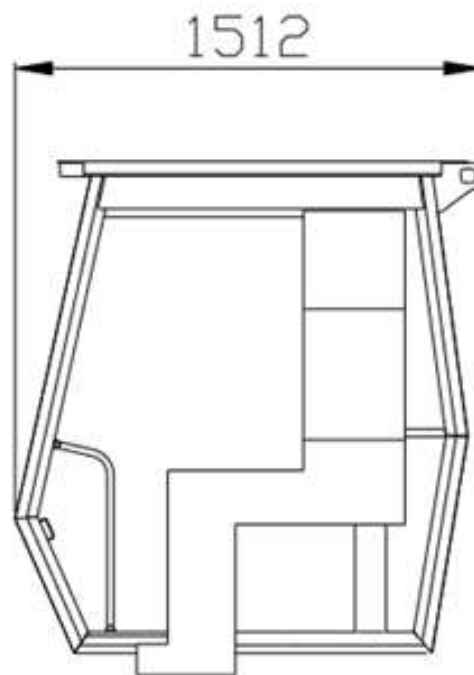


Рисунок 4.2 – Габаритные размеры кабины (вид сбоку)

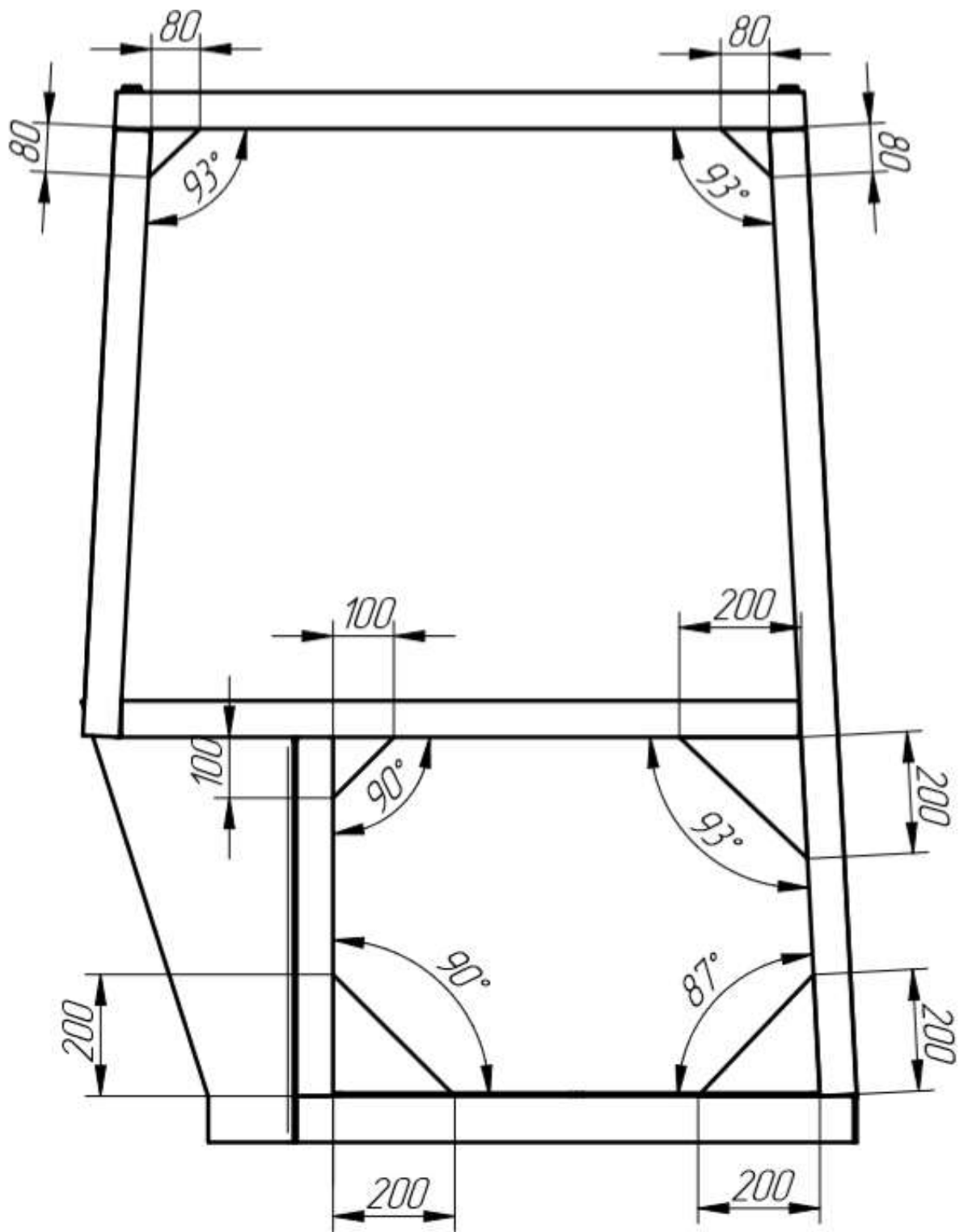


Рисунок 4.3 – Передняя стенка

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

64

– ребра жесткости имитировались стержневыми элементами.

Данные допущения значительно сокращают машинное время расчета при сохранении требуемой точности.

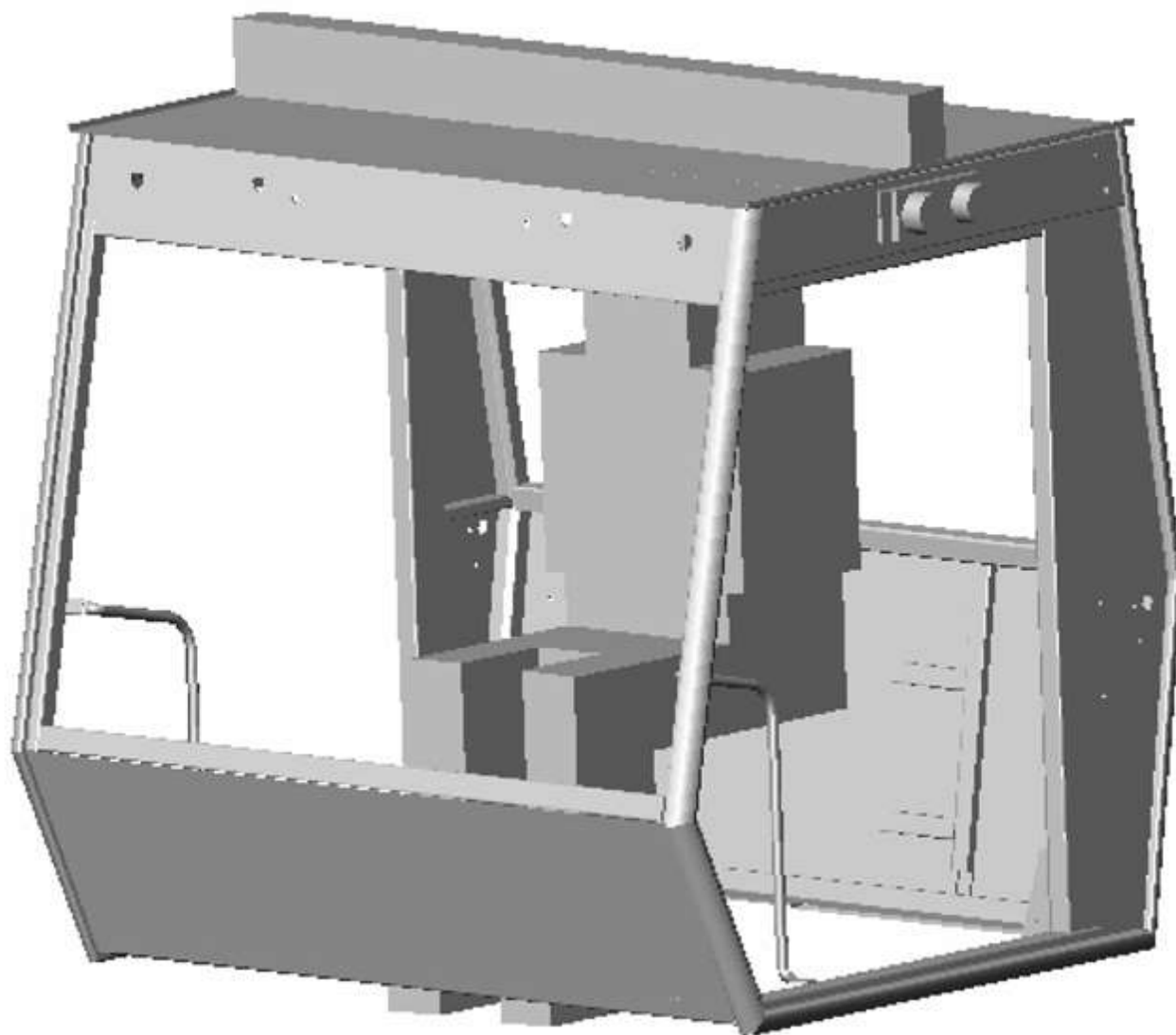


Рисунок 4.5 – Геометрическая модель кабины катка RV – 21

Сечения профилей балочных элементов, примененных в конструкции кабины RV-21, представлены на рисунке 4.6.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

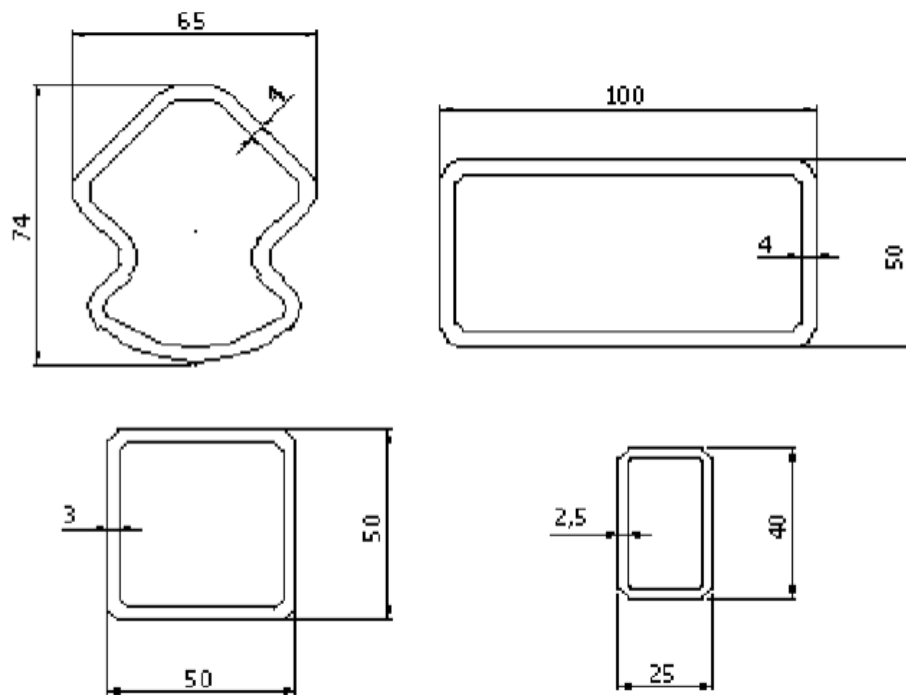


Рисунок 4.6 – Сечения профилей примененных в конструкции кабины
 Объемная модель разбивалась на конечные элементы. Практически
 везде (у простой геометрии) использовалась структурированная
 (упорядоченная) сетка (рисунок 4.7).

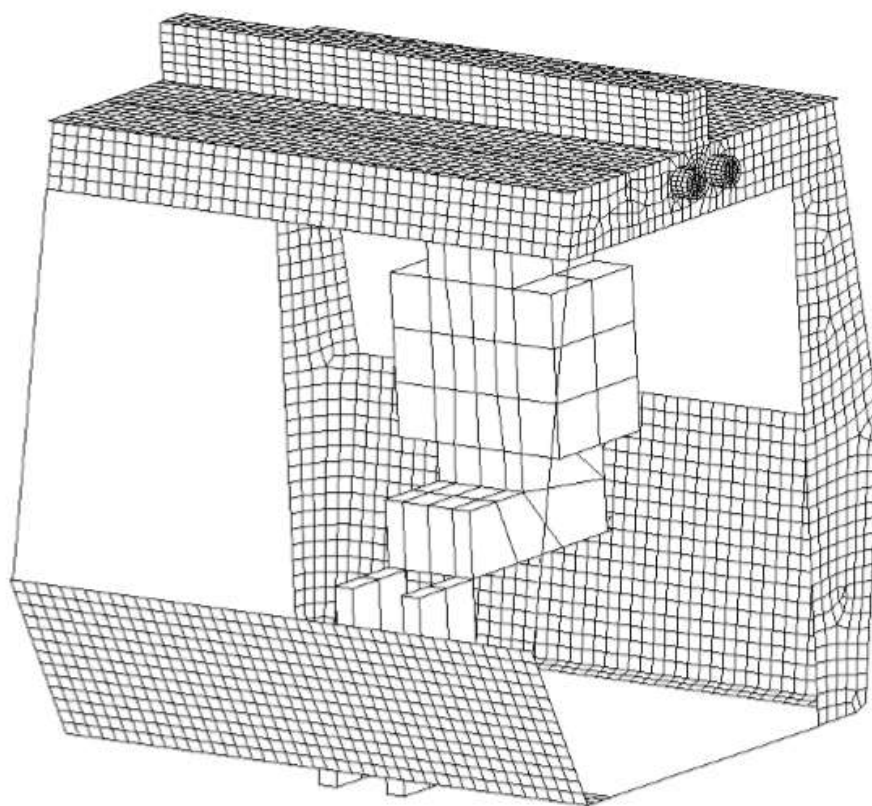


Рисунок 4.7 – Конечно-элементная модель кабины
 Для оценки наиболее рационального размера конечного элемента
 предварительно проводился ряд статических расчетов при одинаковой

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

67

Модель жестко закреплялась по нижним плоскостям основания кабины. Область DVL также жестко закреплялась по нижнему основанию. В качестве закрепления использовалась фиксированная заделка (запрещены все перемещения и повороты).

В конструкции использованы материалы:

- сталь Ст 10 с пределом текучести $\sigma_T = 260$ МПа,
- сталь Ст3сп2 с пределом текучести $\sigma_T = 255$ МПа,
- сталь Ст2кп2 с пределом текучести $\sigma_T = 205$ МПа,
- сталь S235JR с пределом текучести $\sigma_T = 302$ МПа.

Таблица 4.1 Физико-механические свойства стали

Параметр	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Предел выносливости	Пластичность
обозначение (размерность)	E (Мпа)	μ	σ_B (МПа)	δ_B (%)
значение	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	470	21

Для учета упруго-пластических свойств материал задавался диаграммой закона пластического течения, предполагающего мультилинейное упрочнение в случае нагружения и упругую разгрузку.

Величины прилагаемых сил и последовательность их приложения приведены в таблице 4.1.

Нагрузки, прилагаемые к конечно-элементной модели приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения усилий и запасенной энергии, которые должны быть реализованы в численном эксперименте

Вид нагружения	Нагружающая сила, Н	Энергия, запасенная конструкцией, Дж
Боковое	121 796	24 015
Вертикальное	411 810	–
Продольное	97 438	–

Для учета пластического состояния конструкции статическая задача решалась в постановке нелинейного анализа при расчете пластичности по von Mises с учетом эффекта больших перемещений. Такая постановка задачи позволяет учесть два вида нелинейности:

- нелинейность материала (за счет введения диаграммы пластичности);
- нелинейность геометрии (обновление направления нагрузки с учетом полученных деформаций).

Решение нелинейных задач осуществляется пошагово с начальным интервалом 0,01 сек. Число шагов нагружения выбиралось автоматический, из условий:

- сходимости решения;
- малых приращений нагрузки на каждом шаге;
- допустимых погрешностей линейного поведения конструкции.

Расчет проводился в нелинейной статике с пошаговым нагружением.

4.4 Боковое нагружение кабины RV-21

При боковом нагружении, нагрузка увеличивалась до тех пор, пока энергия, запасенная конструкцией, не превысила значения, приведенного в таблице 2.

На рисунке 4.9 представлена деформированная конструкция кабины после приложения боковой нагрузки (масштаб изображения деформаций 1:1). Боковое перемещение узлов в области приложения нагрузки составило 281 мм.

DISPLACEMENT

STEP=1

SUB =38

TIME=1

DMX =221.177

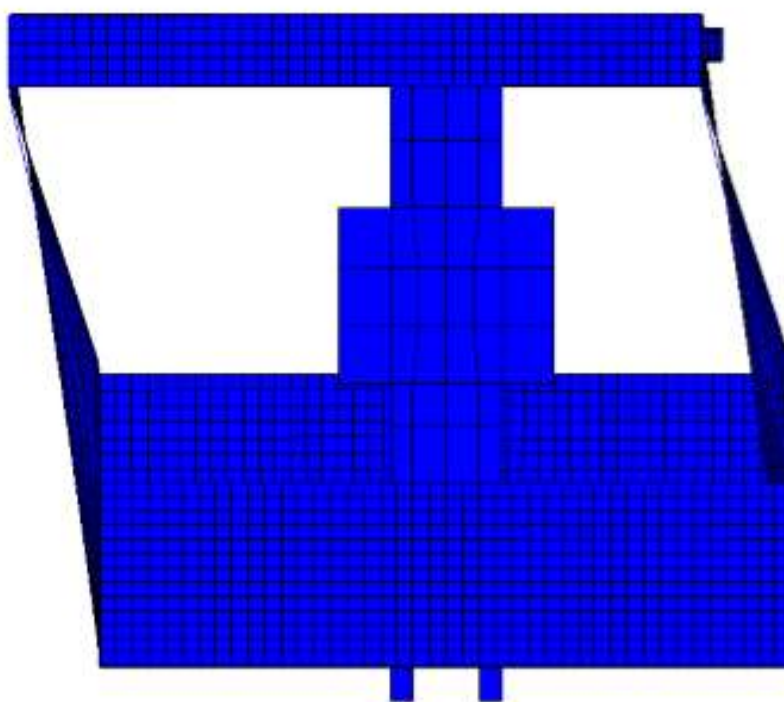


Рисунок 4.9 – Деформированная кабина после бокового нагружения
(вид спереди)

Энергия деформации определялась расчетной программой МКЭ. Величина энергии, запасенной конструкцией, составила 28 355 Дж.

На рисунке 4.10 изображены суммарные перемещения узлов кабины после бокового нагружения, а на рисунке 4.11 изображены эквивалентные (по Мизесу) напряжения в листовом материале.

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =38
 TIME=1
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =221.177
 SMX =221.177

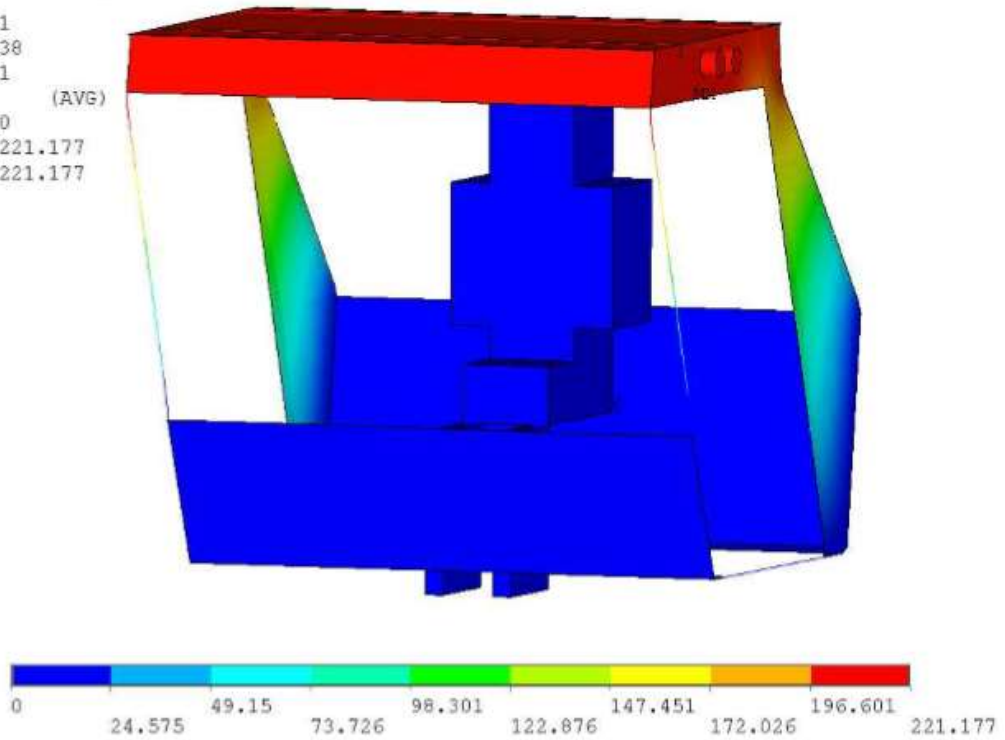


Рисунок 4.10 – Суммарные перемещения узлов кабины после бокового нагружения

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =38
 TIME=1
 SEQV (AVG)
 DMX =221.177
 SMX =265.304

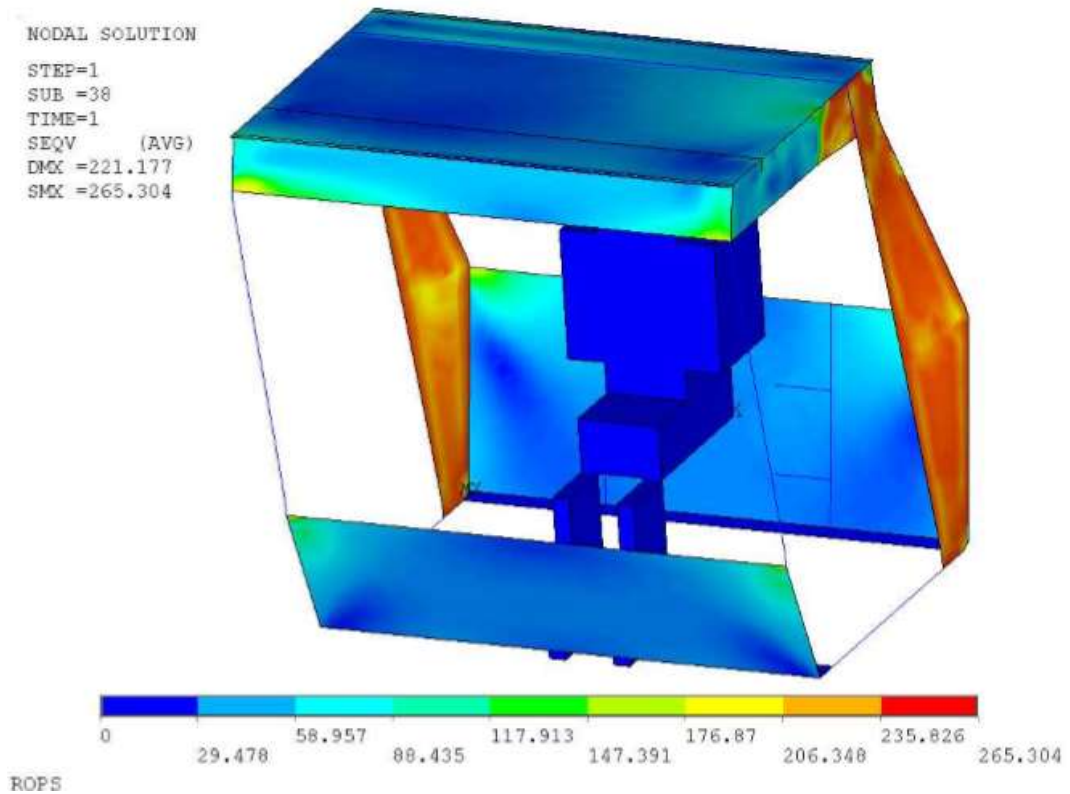


Рисунок 4.11 – Напряжения в листовом материале после бокового нагружения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

72

На рисунке 4.12 изображены эквивалентные напряжения в балочных элементах. Элементы профиля Voestalpine Euro Stahl H128.11 отображаются программой только в виде сечений.

ELEMENT SOLUTION

STEP=1
 SUB =38
 TIME=1
 SEQV (NOAVG)
 DMX =221.393
 SMX =302.026

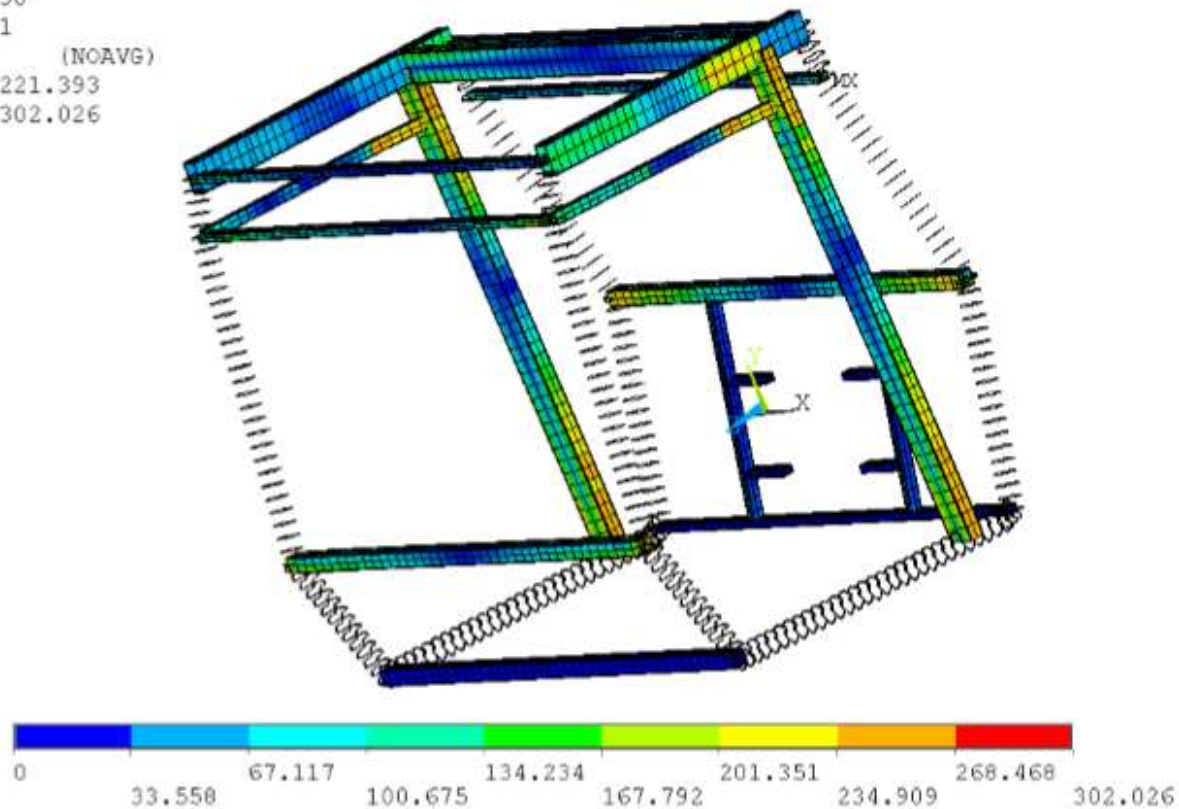
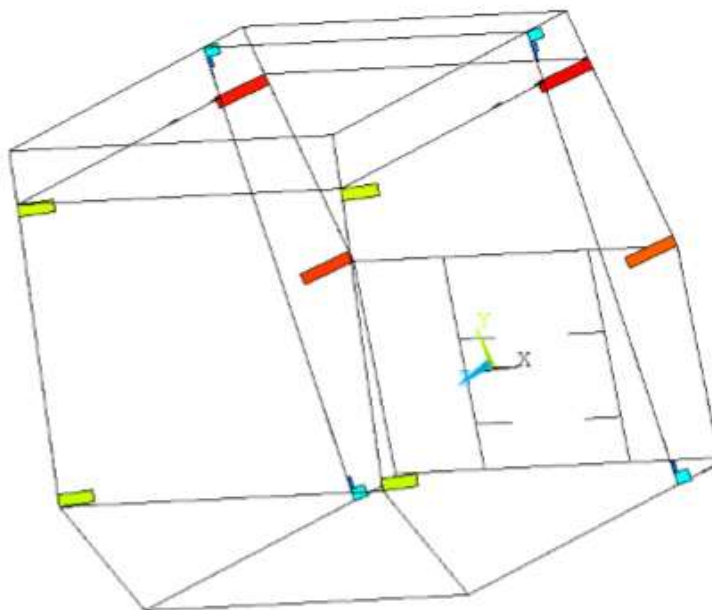


Рисунок 4.12 – Напряжения в балочных элементах после бокового нагружения

На рисунке 4.13 помечены флажками элементы, которые запасли максимальную энергию деформации (на шкале значения энергии в Н·мм).

LINE STRESS
 STEP=1
 SUB =30
 TIME=1
 SENE SENE
 MIN =0
 ELEM=6496
 MAX =.325E+07
 ELEM=7177



ROPS

Рисунок 4.13 – Элементы, накопившие наибольшую энергию деформации после бокового нагружения

При боковом нагружении усилием в 121 796 Н перемещение точек конструкции в области приложения силы составила 281 мм. Величина запасенной энергии равна 26 355 Дж.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

74

4.5 Вертикальное нагружение кабины RV-21

После снятия боковой нагрузки к деформированной конструкции кабины прикладывалась вертикальная нагрузка. Нагрузки прикладывалась посредством распределителей нагрузки (абсолютно жесткий элемент, контактирующий с конструкцией по некоторой плоскости).

На рисунке 4.14 изображены эквивалентные напряжения (по Мизесу) в листовом материале конструкции после приложения вертикальной нагрузки.

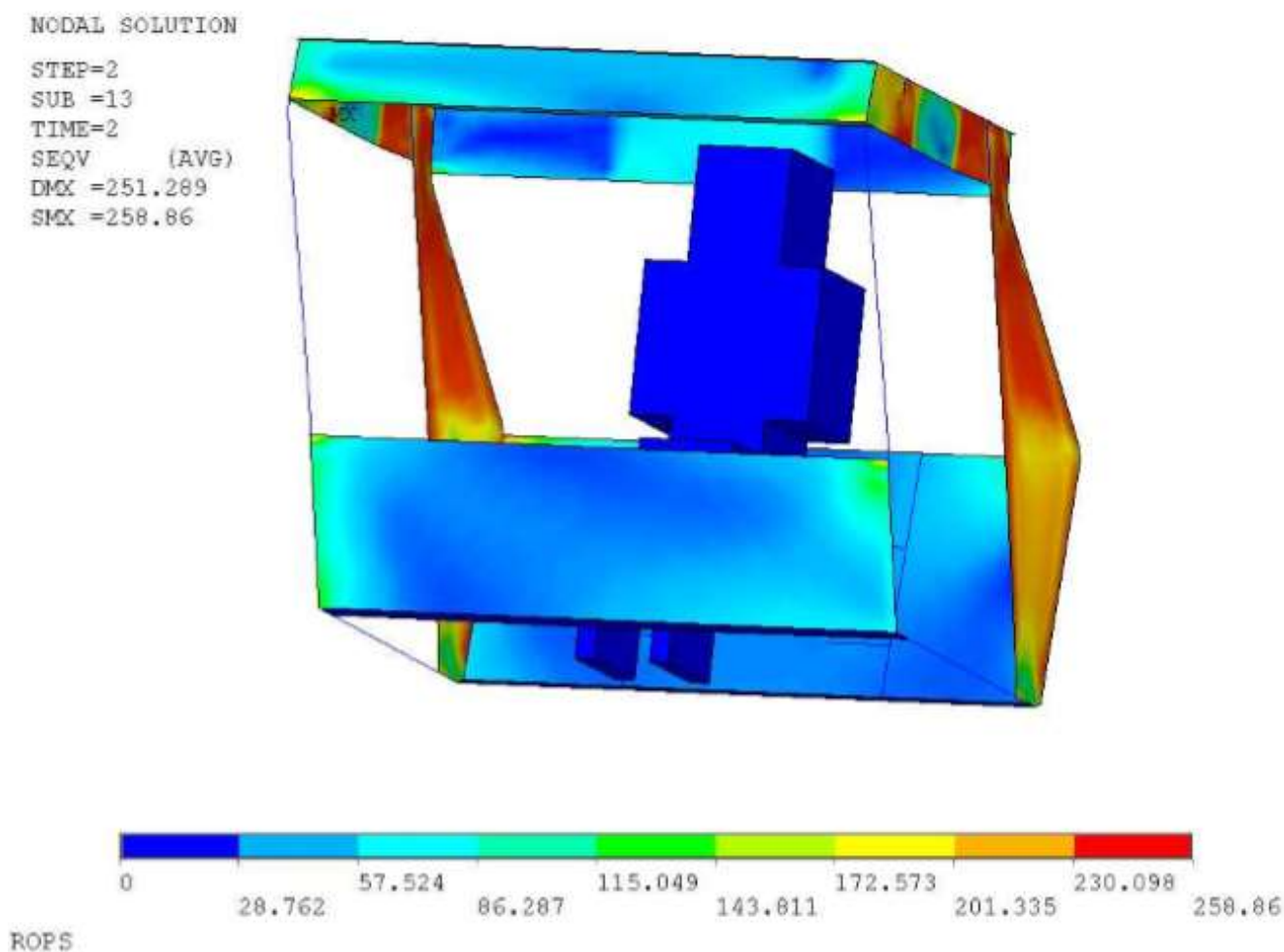


Рисунок 4.14 – Напряжения в листовом материале после вертикального нагружения

На рисунке 4.15 изображены пластические деформации в листовом материале, а на рисунке 4.16 – в балочных элементах в результате вертикального нагружения.

NODAL SOLUTION

STEP=2
SUB =13
TIME=2
EPPL1 (AVG)
DMX =221.204
SMX =.024301

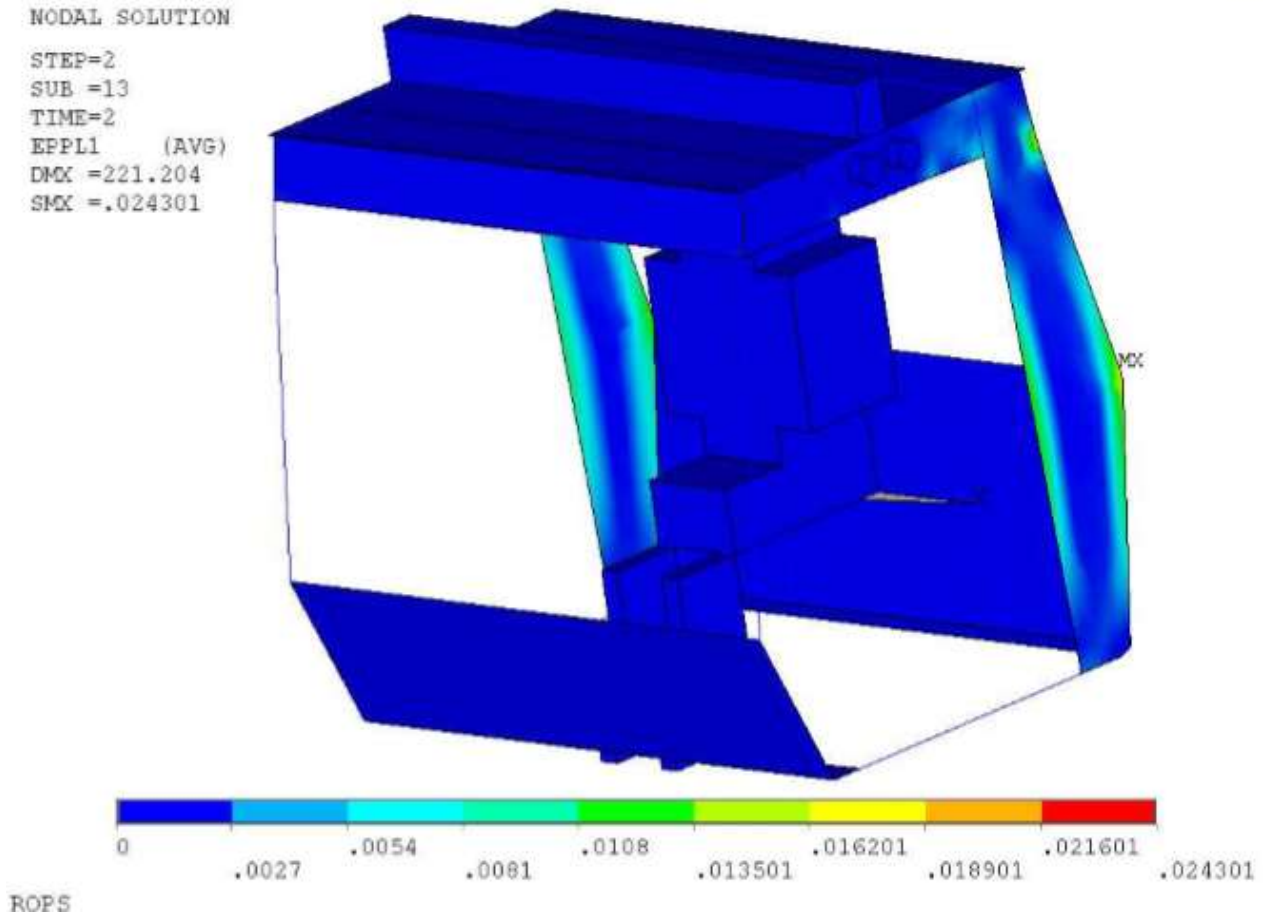


Рисунок 4.15 - Пластические деформации в листовом материале конструкции

На рисунке 4.17 показан уровень пластических деформаций в балочных элементах. На рисунке 4.18 и 4.19 изображены перемещения элементов конструкции после вертикального нагружения.

NODAL SOLUTION

STEP=2
SUB =13
TIME=2
SEQV (AVG)
DMX =251.512
SMX =302.029

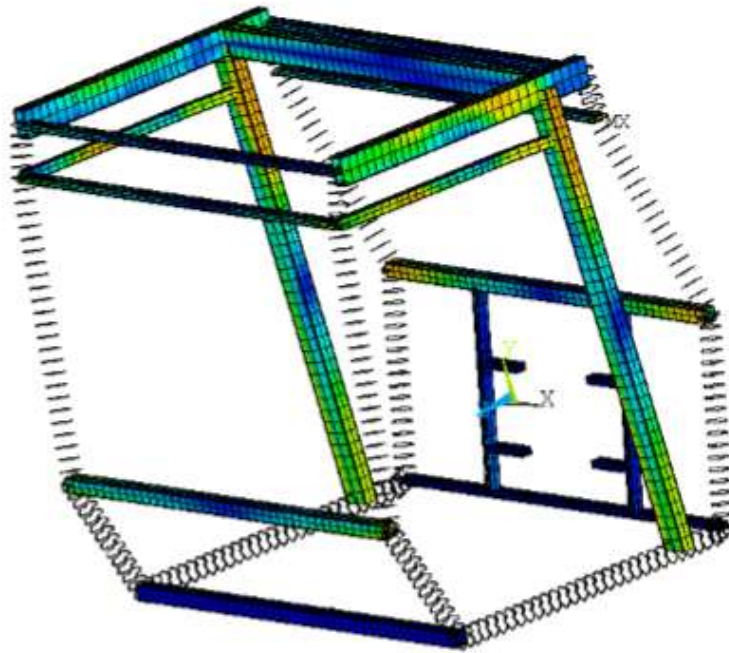
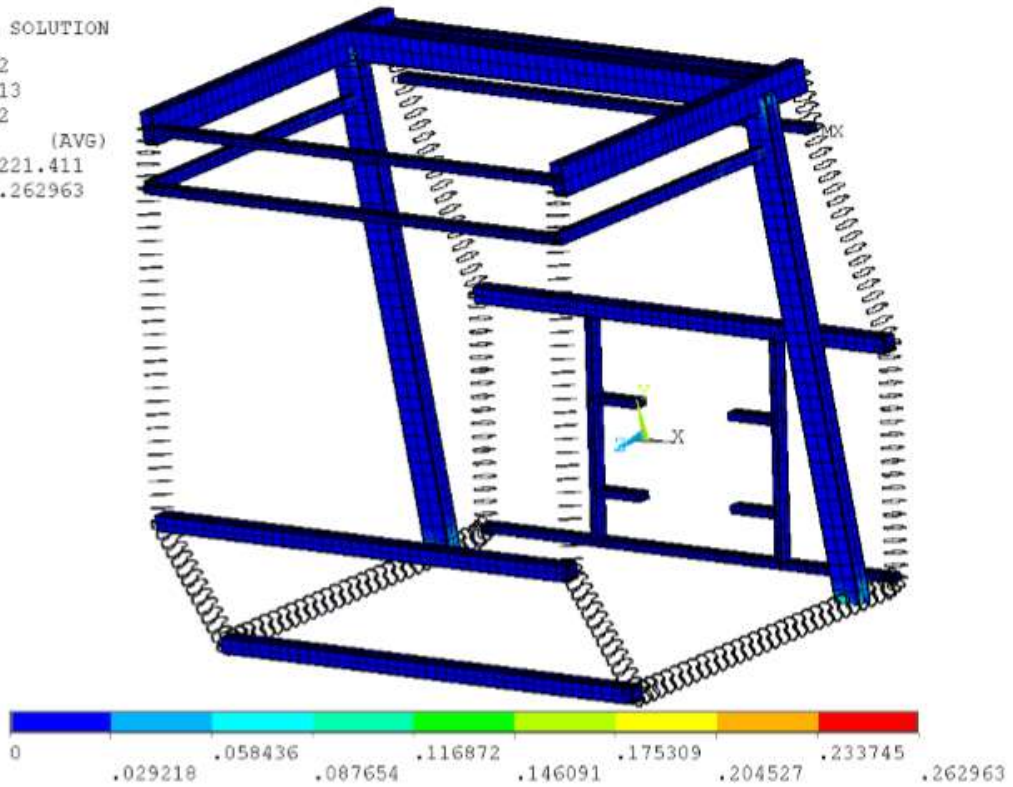


Рисунок 4.16 – Напряжения в балочных элементах после вертикального нагружения

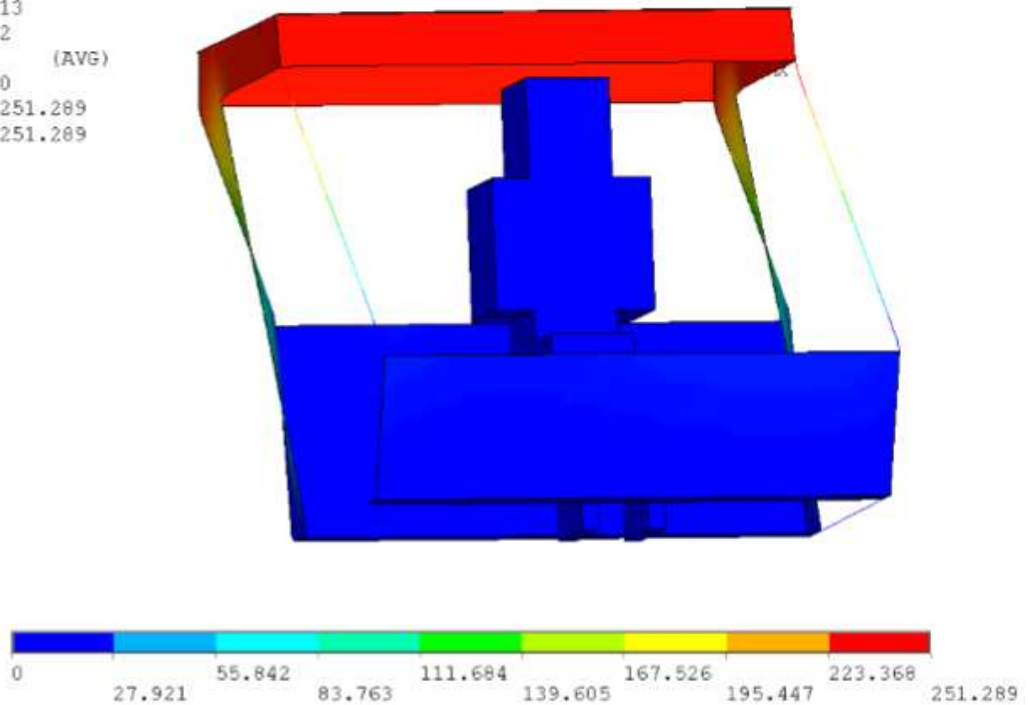
NODAL SOLUTION
 STEP=2
 SUB =13
 TIME=2
 EPPL1 (AVG)
 DMX =221.411
 SMX =.262963



ROPS

Рисунок 4.17 – Пластические деформации после вертикального нагружения

NODAL SOLUTION
 STEP=2
 SUB =13
 TIME=2
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =251.289
 SMX =251.289



ROPS

Рисунок 4.18 – Перемещения после вертикального нагружения (вид спереди)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

78

NODAL SOLUTION

STEP=2
SUB =13
TIME=2
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =251.289
SMX =251.289

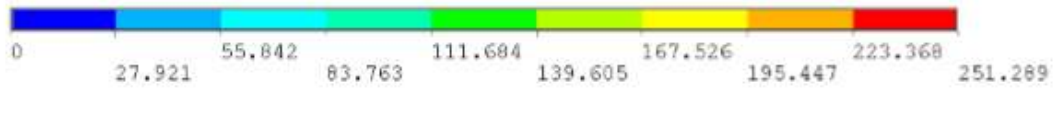
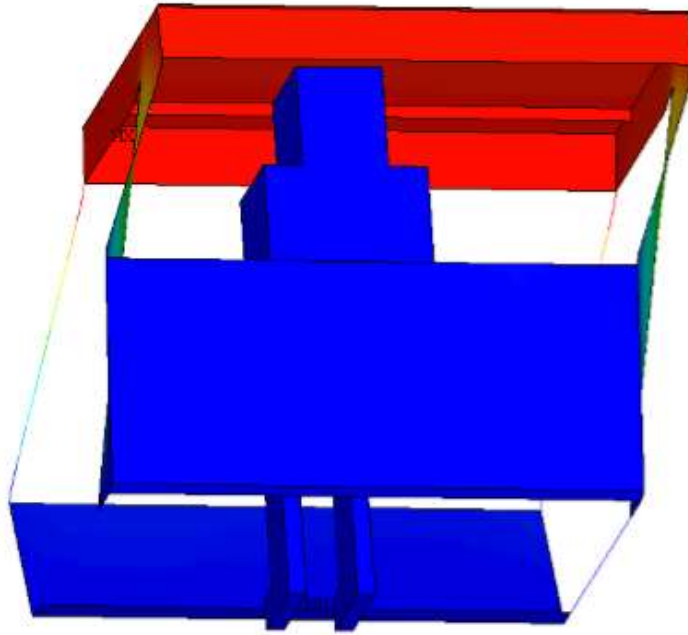


Рисунок 4.19 – Перемещения после вертикального нагружения (вид сзади)

Максимальное усилие при вертикальном нагружении равно 411 810 Н.

4.6 Продольное нагружение кабины RV-21

После снятия вертикальной нагрузки к конструкции прикладывалась продольная нагрузка. Результаты расчетов приведены на:

Рисунке 4.20 – перемещения элементов конструкции после приложения продольной нагрузки.

Рисунке 4.21 – эквивалентные напряжения в листовом материале после продольного нагружения.

Рисунке 4.22 – эквивалентные напряжения в балочных элементах после продольного нагружения.

Рисунках 4.23-4.24 – пластические деформации в элементах кабины.

Рисунке 4.25 – эквивалентные напряжения в сечениях наиболее напряженного элемента из профиля Voestalpine EuroStahl H128.11.

Рисунке 4.26 – интенсивность пластических деформаций в сечениях того же элемента.

NODAL SOLUTION

STEP=4
SUB =13
TIME=4
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =222.006
SMX =222.006

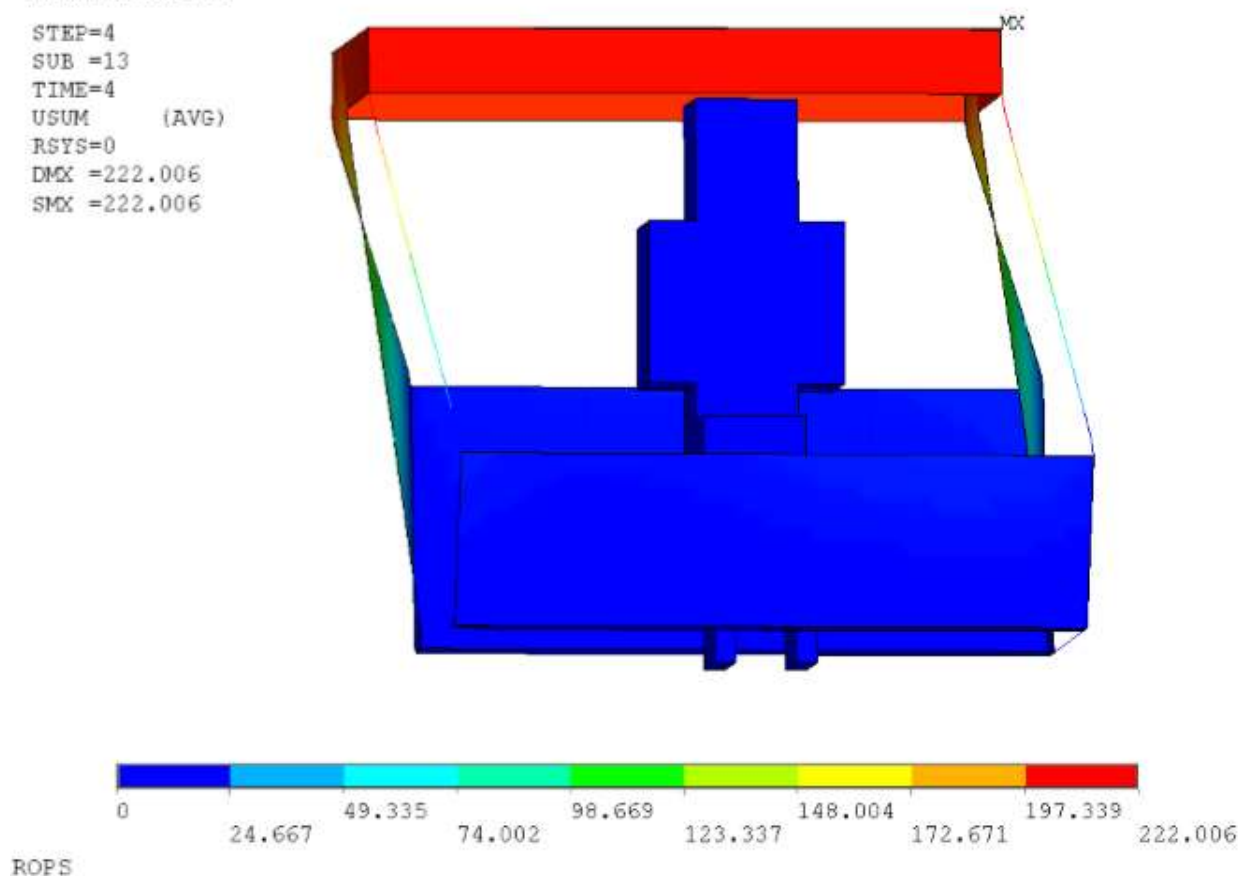


Рисунок 4.20 – Перемещение конструкции после продольного нагружения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

80

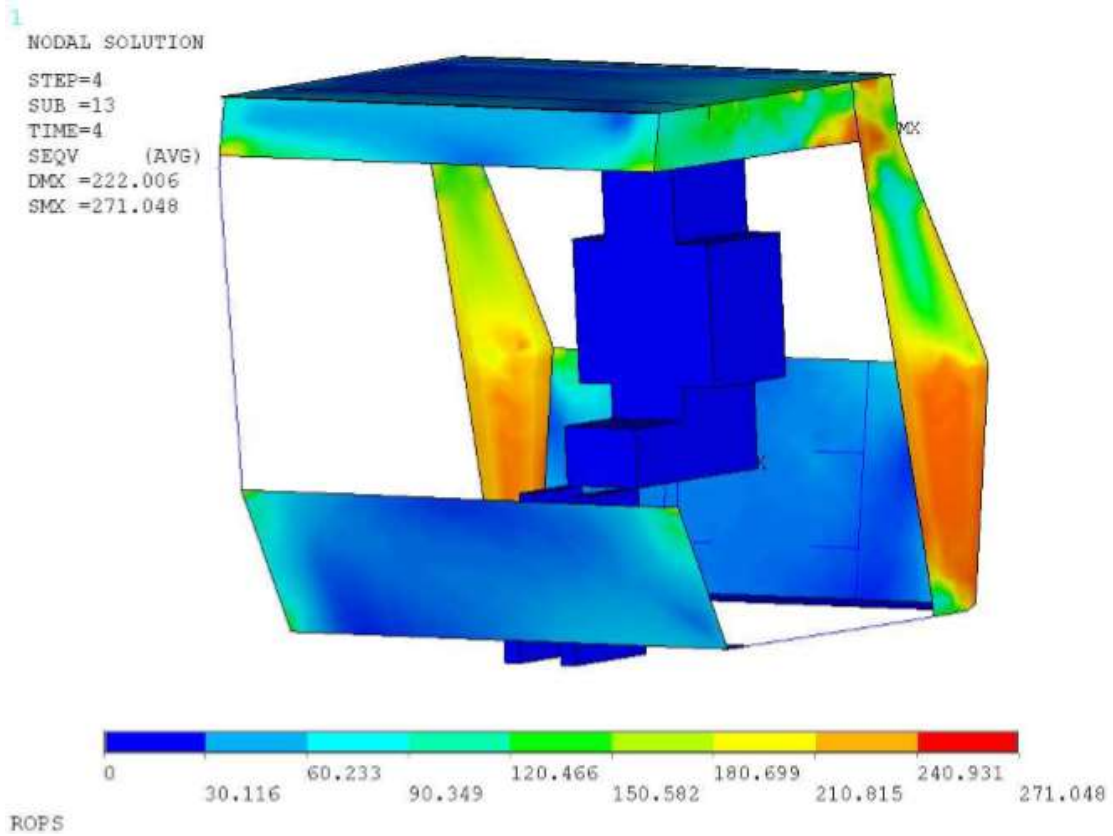


Рисунок 4.21 – Напряжения в листовом материале при продольном нагружении

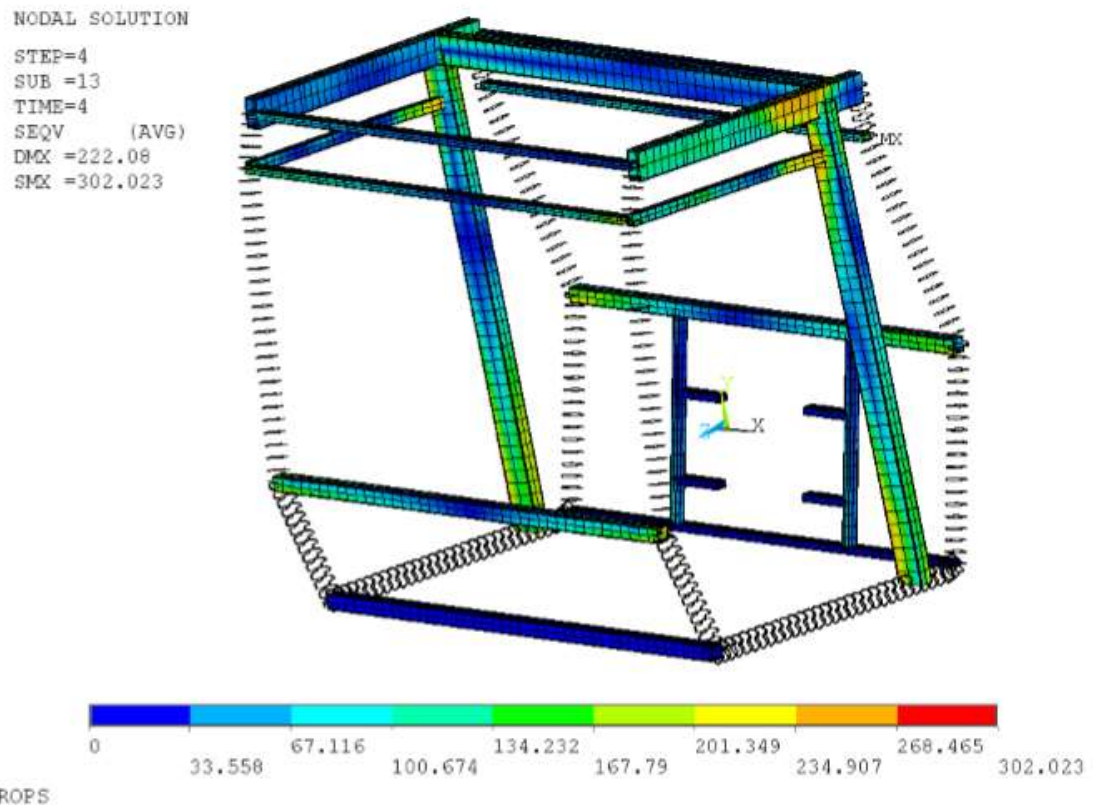


Рисунок 4.22 – Напряжения в балочных элементах при продольном нагружении

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

81

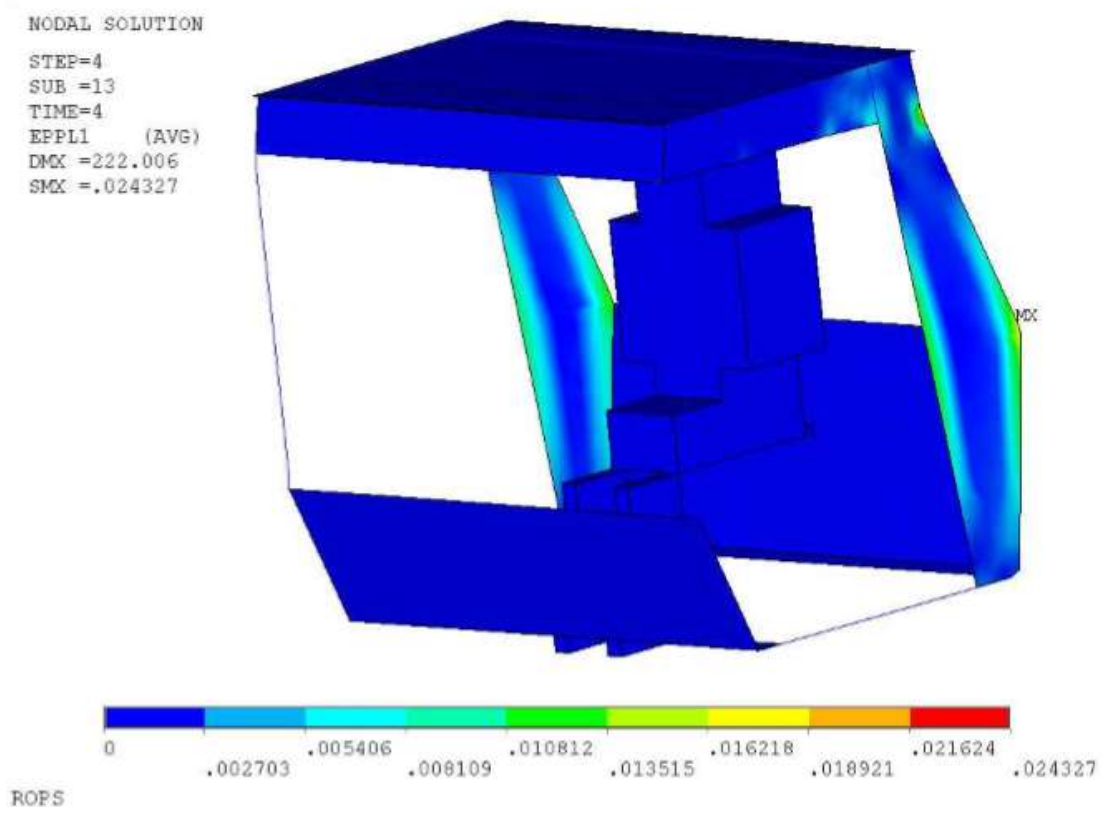


Рисунок 4.23 – Пластические деформации в листовом материале

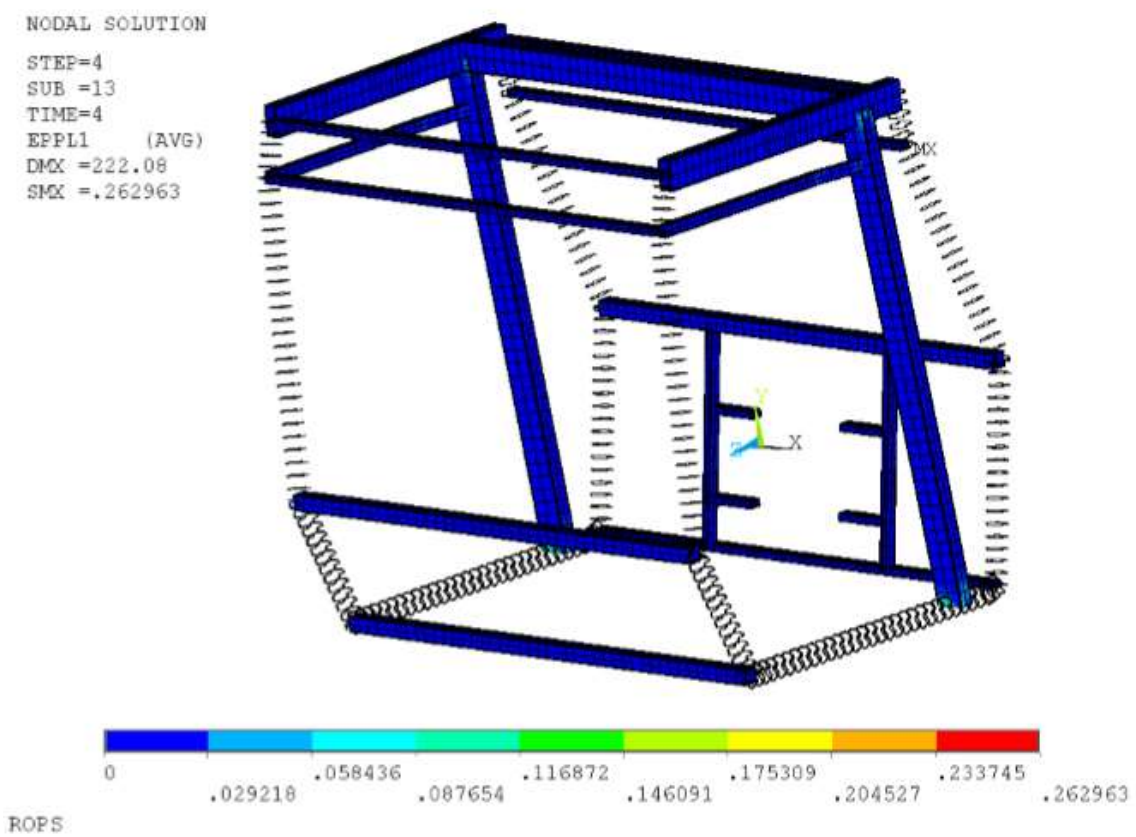


Рисунок 4.24 – Пластические деформации в балочных элементах

ELEMENT SOLUTION

STEP=4
SUB =13
TIME=4
SEQV (NOAVG)
DMX =216.221
SMN =-16.044
SMX =302.023

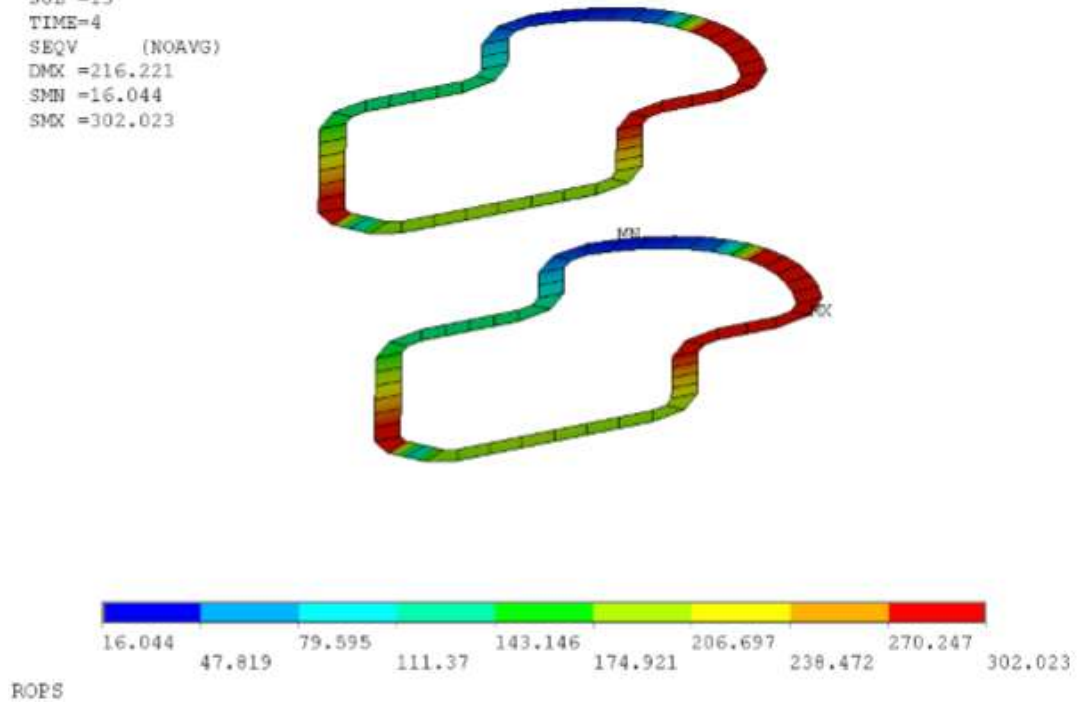


Рисунок 4.25 – Эквивалентные напряжения в сечениях наиболее напряженного элемента из профиля Voestalpine EuroStahl H128.11

NODAL SOLUTION

STEP=4
SUB =13
TIME=4
EPPLINT (AVG)
DMX =216.221
SMN =.005741
SMX =.264225

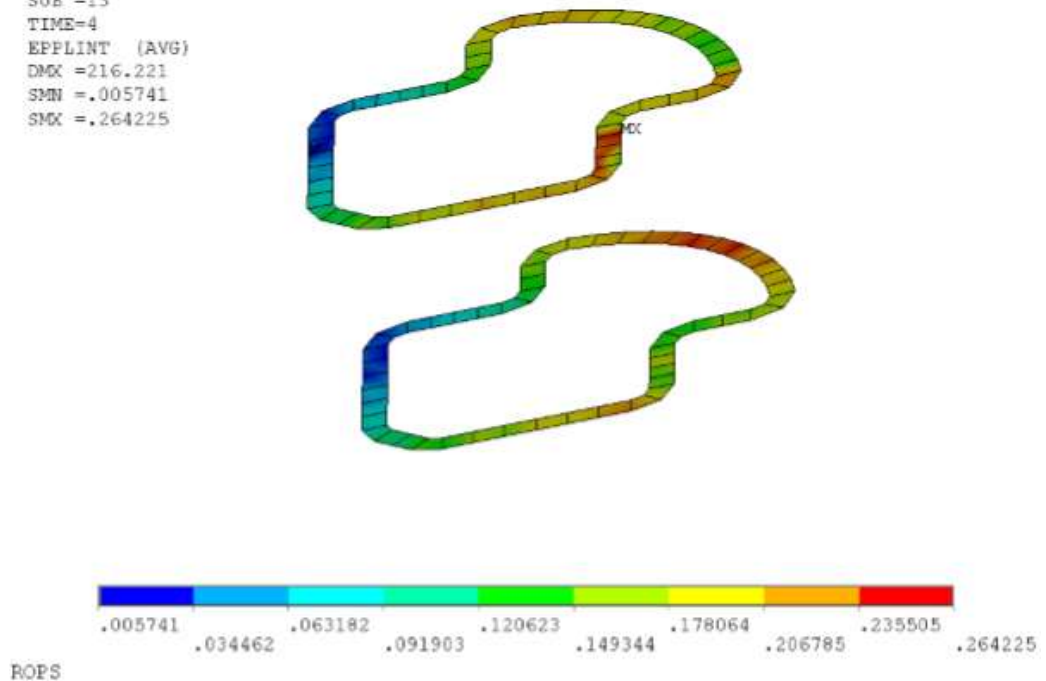


Рисунок 4.26 – Интенсивность пластических деформаций в сечениях наиболее напряженного элемента из профиля Voestalpine EuroStahl H128.11

4.7 Оценка результатов численного эксперимента

В результате численного эксперимента получено:

- после приложения боковой нагрузки в размере 121 0796 Н энергия деформации, накопленная конструкцией, составила 26 355 Дж, что больше требуемого значения 24 016 Дж.

- после последовательного приложения боковой, вертикальной и продольной нагрузки элементы кабины испытывают пластические деформации. Максимальные пластические деформации в листовом материале составляют 2,4%, а в элементах кабины, изготовленных из профилей, 26,3% (профиль Voestalpine EuroStahl H128.11).

- после снятия боковой нагрузки деформированная конструкция защитного устройства ROPS подверглась статическому нагружению вертикальной нагрузки (411 810 Н) и продольной нагрузки (97 438 Н). На всех этапах нагружения, устройство ROPS обеспечивает отсутствие проникновения элементов кабины в объем ограничения деформаций DLV.

- ROPS, установленное на кабине катка RV-21, удовлетворяет требованиям ГОСТ Р ИСО 3471-99.

Расчетный метод имеет ряд преимуществ:

- существенная экономия времени разработки;
- снижение стоимости изделия.

Из проведенного расчета четырех-стоечной конструкции защитной кабины вибрационного катка PV-21 фирмы «РАСКАТ» массой машины 21 000 кг. видно, что конструкция ROPS выдержала все приложенные к ней, согласно ГОСТ нагрузки, набрана необходимая величина энергии и пластические деформации проходят без проникновения в зону DLV.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

4.8 Оценка адекватности численного эксперимента

Оценкой адекватности любой математической модели служит эксперимент. Сравнительные значения максимальных усилий, значения поглощенной энергии и максимального перемещения представлены в таблице 4.3.

Относительная погрешность σ между экспериментальными и расчетными значениями рассчитывалась по формуле (3.5).

Таблица 4.3 - Значения натурального и численного эксперимента

параметр	эксперимент	расчет	погрешность
Боковая сила (Н)	125 900	121 796	3,2 %
Боковое смещение (мм)	290	281	3 %
Энергия (Дж)	25 050	26 355	5 %
Вертикальная сила (Н)	420 000	411 810	2 %
Продольная сила (Н)	102 000	97 438	4,5 %

Данные таблицы 4.3 показали, что расхождения по всем замеряемым величинам (усилиям, деформации и поглощенной энергии) не превышают 5 %, что соизмеримо в погрешностью самого эксперимента (формула 3.5). Такие результаты подтверждают адекватность конечно-элементной модели.

Дополнительно проводилась сравнение результатов натурального и численного эксперимента по данным процесса деформации при боковом нагружении.

Поскольку расчет проводился нестатический (с учетом нелинейных свойств материала и пластических деформаций конструкции), то нагружение велось пошагово. Шаг нагружения вычислялся автоматически в зависимости от сходимости задачи. На рисунке 4.27 приведены экспериментальная (трендовая) и расчетная зависимость боковой силы F_y от перемещения Δ .

Анализ полученных кривых показывает, что вначале расчетная кривая идет значительно выше экспериментальной кривой. Это объясняется тем, что в математической модели в качестве граничных условий использовалась

фиксирующая заделка, которая не учитывает упругих свойств рамы, на которую крепиться защитная кабина.

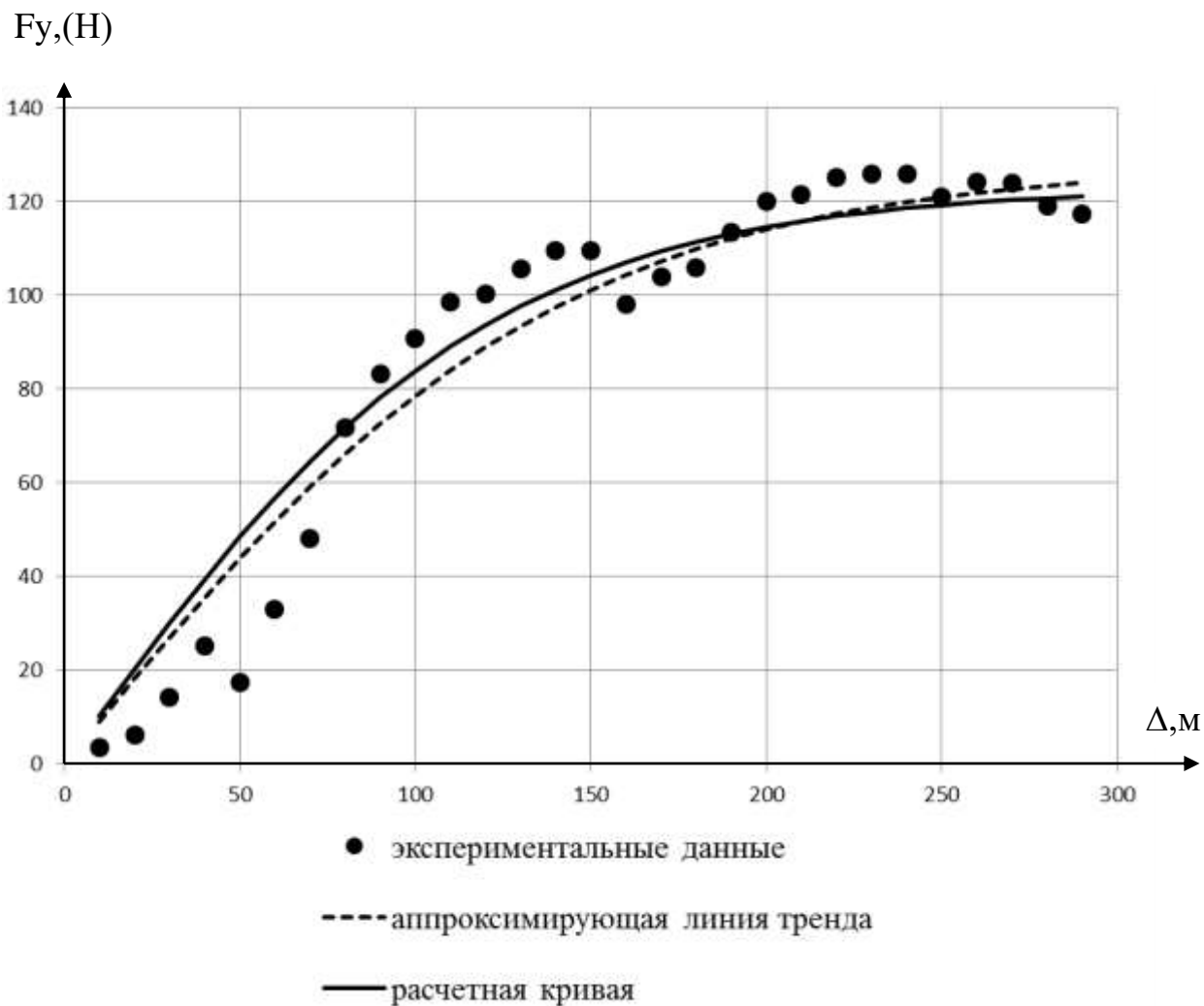


Рисунок 4.27 – Зависимости боковой силы от перемещения

В дальнейшем тенденция меняется и расчетная кривая опускается даже несколько ниже экспериментальной, что объясняется заданными (идеальными) свойствами материала. Вместе с тем, экспериментальная и расчетная кривая хорошо коррелируются (квадрат коэффициента Пирсона равен 0,955).

В результате проведенных исследований по сравнению результатов натурного и численного эксперимента можно подтвердить адекватность построенной конечно-элементной модели, что подтверждает возможность замены дорогостоящих натуральных экспериментов расчетными методами.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ

Лист

86

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1) Согласно требованиям безопасности все защитные устройства кабины ROPS от опрокидывания должны быть сертифицированы. Сертификат действует пять лет, после чего требуется его подтверждение. Согласно современным требованиям сертификация может быть проведена только на основе натурного эксперимента. Усилия нагружения защитного устройства являются функциями массы всей машины.

2) В процессе натурного эксперимента получены следующие результаты:

- при боковой нагрузке с силой 125 900 Н конструкция получила максимальные перемещения 290 мм и погасила энергию 25 050 Дж,
- выдержала статическую вертикальную нагрузку с силой 420 000 Н,
- выдержала статическую продольную нагрузку с силой 102 000 Н.

3) В результате сделано заключение о соответствии конструкции ROPS требования ГОСТ по безопасности кабины катка PV-21 при опрокидывании. Выдан сертификат соответствия, который действителен для кабин всех модификаций катков фирмы «РАСКАТ» не превышающих массу 21 тонну: RV-18; RV-19; RV-20 и RV-21.

4) Для проведения численного эксперимента методом конечных элементов была построена конечно-элементная 3D модель, выполнен нестационарный расчет с использованием программного пакета ANSYS. Результаты численного эксперимента подтвердили соответствие защитного устройства требованиям безопасности. Сравнение результатов численного и натурного эксперимента показало хорошую сходимость. Максимальная погрешность составила 5%, что соизмеримо с погрешностью эксперимента.

5) Сделан вывод о возможности замены натуральных экспериментов численными методами.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Компакторы, уплотнители твердых бытовых и промышленных отходов. Устройство, основы расчета: учебное пособие/ Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Селиверстов Н.Д. – М.: МАДИ. 2014. – С. 100.
- 2 Твёрдые бытовые отходы: объективная реальность, проблемы накопления и переработки / Внукова Н.В., Беспалова М.В., Зубова Ю.С., Горох Н.П. – Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета 2008. № 43. –С. 73-77.
- 3 Бульдозер-компактор БКК-1Л: Руководство по эксплуатации 61-18РЭ. – Челябинск: ООО «ЧТЗ-Уралтрак», 2009. – 95 с.
- 4 Мирного, А.Н. Санитарная очистка и уборка населенных мест: под ред. – А.Н. Мирного. М.: Академия коммунального хозяйства, 1997. – 318 с.
- 5 Систер, В.Г Твёрдые бытовые отходы: справочник под ред.– В.Г. Систер М.: Академия коммунального хозяйства, 2001. – 319 с.
- 6 Бульдозер-компактор колесный БКК-2: Руководство по эксплуатации ЧТЗ-ПК65.00.00.500РЭ. – Челябинск: КЦ ДСМ ООО «ЧТЗ-Уралтрак», 2013. – 88 с.
- 7 Вершинский, Л.В. Новый модернизированный бульдозер–компактор БКК–1 ООО «ЧТЗ–Уралтрак» / Вершинский, Л.В., Трояновская, И.П. / Корпоративный журнал ООО «ЧТЗ–Уралтрак». – 2006. –№3(7). – с.33–36.
- 8 Шаталинская, Е.А. и др. Стенд для испытаний защитных устройств промышленных тракторов / под ред. Шаталинская, Е.А.: Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1989. № 11. С. 23-24.
- 9 Систер, В.Г Твёрдые бытовые отходы: справочник под ред. – В.Г. Систер М.: Академия коммунального хозяйства, 2001. – 219 с.
- 10 Воронич, С.С. Что такое твердые бытовые отходы и их воздействие на окружающую природную среду? / С.С. Воронич, Н.Н. Роева, Н.Н. Гребёнкин – Экологические системы и приборы. 2017. – № 7. – С. 37-42.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

- 11 Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / под ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер пресс. – 2002. – 224 С.
- 12 ГОСТ 12.2.019-2005 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности. М.: Стандартиформ. 2005. 28 с.
- 13 ГОСТ Р ИСО 3471-2009 Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания. – М.: Стандартиформ. 2009. – 30 с.
- 14 Ермакова, О.Н., Бытовые отходы: проблемы нормирования / О.Н. Ермакова, Г.Е. Никифорова / Твердые бытовые отходы. 2009. – № 10. – С. 24-26.
- 15 Зузов, В.Н., Оценка пассивной безопасности кабин тракторов на стадии проектирования / В.Н. Зузов, И.В. Маркин – Тракторы и сельхозмашины. 2001. № 4. С. 26-27.
- 16 Илинич, И.М. Расчет, проектирование и испытание кабин тракторов / И.М. Илинич, В.В. Никонов, Б.И. Кальченко. – М.: Агропромиздат. – 1989. – 213 С.
- 17 Бояршинов, М.Г. Разработка методики замены натуральных испытаний численным моделированием динамических характеристик двигателя / М.Г. Бояршинов, А.А. Скутин – Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – с. 5–22.
- 18 Ложечко, В.П., Шестопалов А.А., Строительные и дорожные машины. / В.П. Ложечко, А.А. Шестопалов – Машины для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей. 2006. – страницы 22 – 25.
- 19 ТР ТС 010/2011. О безопасности машин и оборудования. Технический регламент таможенного союза. 2011. 66 С.
- 20 РД 24.220.03–90. Машины строительные и дорожные: Нормы расчета. – М.: НПО «ВНИИСтройдормаш», 1990. – 112 с.
- 21 Испытания устройства защиты при опрокидывании – ROPS кабины катка PV-21: Протокол № 11/17. От 13.11.2017.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89

- 22 Серов, С.И Испытания защитного устройства ROPS промышленного трактора / С.И. Серов, Д.И. Нарadowый, И.П. Трояновская – Тракторы и сельхозмашины. 2018. – №3. – С. 15-19.
- 23 Уплотнитель для полигонов промышленных и бытовых отходов РЭМ-25: Руководство по эксплуатации РЭМ-25.000.000РЭ. – Рыбинск: ОАО «Раскат», 2010. – 64 с.
- 24 Уплотнитель для полигонов промышленных и бытовых отходов РЭМ-25: Руководство по эксплуатации. Ч. 2. Технология работ с использованием уплотнителя для полигонов твердых промышленных и бытовых отходов РЭМ-25. РЭМ-25.000.000РЭ1. – Рыбинск: ОАО «Раскат», 2010. – 31 с.
- 25 Ложечко, В.П Уплотняющие машины. Пособие по выбору оборудования для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей (на примере машин, выпускаемых ОАО «Раскат», г. Рыбинск) / В.П. Ложечко, В.И. Окунев, Р.Д. Окулов [и др.]. – Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати», 2004.
- 26 Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «О техническом регулировании» // Российская газета от 31 декабря 2002. № 245.
- 27 Хархута, Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. / Н.Я. Хархута – Л.: Машиностроение, 1973. –176 с.
- 28 Хвоин, Д.А. Повышение эффективности защитных устройств кабин лесозаготовительных машин: дисс. канд. техн. Наук. / Д.А. Хвоин Петрозаводск, 2011. 125 с.
- 29 Цыганкова, А.П. Утилизация твердых отходов. / А.П. Цыганкова – М.: Стройиздат, 1999г. Страницы 88 с.
- 30 СТО ЮУрГУ 04-2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию / Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. –56 с.

					23.04.02.2018.214.00.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90