

На правах рукописи



**ГУСЕВ Сергей Артурович**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ГУСЕНИЧНЫХ И КОЛЕСНЫХ МАШИН ДЛЯ РАБОТЫ НА  
РАДИОАКТИВНО ЗАРАЖЕННОЙ МЕСТНОСТИ**

Специальность: 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант: Кондаков С.В. – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Филькин Н.М. – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»

Ковалев В.П. – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, генеральный директор ООО «Премикс»

Сарач Е.Б. – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ).

Защита состоится «09» июня 2021 г., в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001. Тел/факс: (351) 267-91-23, e-mail: D212.298.09@mail.ru.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета по адресу: г. Челябинск, пр. Ленина, 76 и на официальном сайте <https://susu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.298.09,  
доктор технических наук, доцент



Абызов А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Сложившаяся в мире ситуация в области образования и обращения (использование, обезвреживание, хранение и захоронение) с радиоактивными отходами ведет к опасному загрязнению окружающей среды, значительному экономическому ущербу и представляет реальную экологическую проблему.

Борьба с радиоактивным загрязнением местности проводится с широким использованием инженерных специальных колесных и гусеничных машин (КГМ). Как правило, эти машины создаются на базе серийной техники с дополнительной установкой противорадиационной защиты (ПРЗ) оператора и части электронного оборудования, а также с мероприятиями по предотвращению попадания радиоактивной пыли и грязи внутрь машины. В дальнейшем под понятием «оператор» в большинстве случаев рассматривается оператор и электронные узлы машины (в том числе у роботизированной техники), нуждающиеся в ПРЗ, уровни защиты которых задаются соответствующими требованиями.

Важность создания и повышения эффективности техники для работы на радиоактивно зараженной местности (РЗМ) подтверждают:

- основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. приказом Президента РФ от 01.03.12 № Пр-539);
- федеральный закон от 11.07.11 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ»;
- перечень программ, утвержденных распоряжением правительства РФ от 11.11.10 № 1950-р (темы 10 и 22), в том числе «Преодоление последствий радиационных аварий», ряд работ по которым продлен до 2025г;
- федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020годы и на период до 2030г» (ФЦП ЯРБ-2).

При работе на РЗМ складывается противоречивая ситуация, заключающаяся в том, что ПРЗ оказывает существенное влияние на эксплуатационные параметры машины и эффективность ее использования. С одной стороны, такая защита позволяет увеличить время нахождения машины (оператора) в зоне радиации и, соответственно, объем выполняемых работ, с другой стороны, установка защиты увеличивает массу и нагрузку на шасси, уменьшает скорость передвижения и тяговое усилие, ухудшает обзорность и т.п., что приводит к снижению технической производительности машины.

В этой связи очевидна необходимость компромиссного разрешения этого противоречия между защитой оператора от радиации и эффективностью использования машины при совершении технологических операций в конкретных условиях эксплуатации на РЗМ.

Известны научные работы, методики оценки и рекомендации применения КГМ с ПРЗ оператора, например, в виде указаний по расчету и проектированию ПРЗ средств инженерного вооружения, расчетов и оценок по ГОСТ В 26457, ГОСТ В 23731 и др. Однако эти научные работы не отражают в явном виде взаимосвязи между параметрами ПРЗ оператора и технико-экономическими параметрами машины. Возможности использования известных рекомендаций при выборе рациональных параметров и конструкций КГМ, работающих на РЗМ, ограничены существующими компоновочными схемами и конструктивными параметрами защиты оператора и машины. Обычно эти рекомендации больше подходят для сравнительной оценки существующих, а не вновь проектируемых машин.

Для выбора рациональных компоновочных схем на этапе проектирования с учетом особенностей использования силовых установок, базового шасси и рабочего оборудования, типов трансмиссий и ходовых систем в конкретных условиях эксплуатации требуется уточнить концепцию и усовершенствовать методологию создания машин, направленную на повышение эффективности их использования при работе на РЗМ. Обоснование и выполнение необходимых параметров и конструкций машин под условия эксплуатации для эффективной работы КГМ на РЗМ нуждается в глубоком анализе, логическом осмыслении, обобщении достигнутых результатов, поиске новых подходов к оценке эффективности технических решений и дальнейшем развитии.

**Цель исследования** – развитие методологии расчета и проектирования КГМ для работы на РЗМ, выработка рекомендаций по совершенствованию параметров таких машин и их внедрение в практику проектирования.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Сформулировать концепцию нового комплексного системного подхода к КГМ с ПРЗ для работы на РЗМ, как основу развития методологии их проектирования.

2. Разработать методику оценки защиты оператора (ряда электронных узлов машины) от ГИ, применимую уже на начальном этапе проектирования (без подробной компоновочной схемы машины).

3. Построить математические модели выбора рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров отдельных элементов и машины в целом для ее эффективной работы на РЗМ. Установить взаимосвязи параметров ПРЗ и технико-экономических характеристик машины.

4. Провести экспериментальную оценку теоретических положений.

5. На основе результатов исследования, дать количественную оценку эффективности предлагаемых мероприятий.

6. Разработать и реализовать практические рекомендации и новые технические решения по совершенствованию машин с ПРЗ.

**Объект исследования** – методы моделирования структурно-функциональных взаимосвязей параметров машины в процессе проектирования инженерных КГМ для работы на РЗМ.

**Предмет исследования** – закономерности влияния ПРЗ на технико-экономические характеристики КГМ различных компоновочных схем, типов трансмиссий, ходовых систем и элементов рабочего оборудования.

**Методы исследований.** Основу исследований составляет системный подход, позволяющий комплексно рассматривать КГМ, предназначенные для работы на РЗМ, с обоснованием рациональных параметров машины в зависимости от условий эксплуатации. В работе использованы методы анализа, обобщения и систематизации параметров и элементов машин; методы теоретической физики и механики, математической статистики и моделирования, теории вероятности; методы дифференциального и интегрального исчисления, конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов, теория движения автомобиля и трактора. При экспериментальных исследованиях применены стандартные и оригинальные методы испытаний.

**Научная новизна:**

1. Сформулирован новый системный подход к расчету и проектированию КГМ для работы на РЗМ, отличающийся рассмотрением ПРЗ как подсистемы машины в системе «радиоактивно зараженная местность – машина – оператор (включая ряд электронных узлов, в том числе у роботизированной техники)», ранее конкретная машина обычно рассматривалась только как база для установки ПРЗ по грузоподъемности.

2. Разработаны методологические основы повышения эффективности работы машины с ПРЗ на РЗМ путем выбора параметров не только необходимой защиты (как было ранее), но и определения отдельными последовательными процедурами взаимосвязанных с защитой параметров машины в целом по критерию «эффект – затраты».

3. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены новые математические модели защиты оператора узлами шасси, рабочего оборудования и кабины, в зависимости от конструкции КГМ (тип ходовой системы, грузоподъемность, габаритно-массовые параметры, место размещения оператора и рабочего оборудования и т.д.) и характеристик РЗМ (мощность, энергия и расположение источника излучения). Особенностью моделей является возможность их применения без подробной компоновочной схемы машины.

4. Получены в явном виде новые зависимости влияния массы и места установленной ПРЗ оператора на основные компоновочные, технические, функционально-стоимостные параметры КГМ (рациональное изменение передаточных чисел трансмиссии, выбор типа шасси колесного автомобиля,

прочностную надежность элементов шасси, параметры рабочего оборудования и др.), определяющие эффективность и производительность машины.

5. Разработаны и практически верифицированы методики моделирования и расчета КГМ с ПРЗ, в том числе в формате комплексных алгоритмов, отличающиеся возможностью на начальном этапе проектирования (при минимуме исходных данных) в зависимости от дифференцированного подхода к задачам проектирования (максимальная эффективность работы, максимальный уровень защиты, другие задачи) определять основные рациональные параметры конкретной машины, работающей на конкретной РЗМ.

### **Практическая ценность**

1. Созданные математические модели и методики позволили рассчитывать и создавать технику с максимальной эффективностью для конкретных условий РЗМ, объективно оценивать и выбирать на стадии проектирования основные параметры таких машин. Использование полученных рекомендаций только по теме «Ларец» позволило увеличить уровень ПРЗ в 1,42 раза (при той же массе защиты) по сравнению с исходным тактико-техническим заданием (определенным по прежним методическим разработкам) и соответственно эффективность работы КГМ на РЗМ.

2. Разработаны новые конструкторско-технологические решения, улучшающие технические характеристики машин, в том числе по защите оператора, повышающие эффективность КГМ, качество и безопасность работ при изготовлении и использовании ПРЗ и машины. Основные разработки защищены 33 патентами РФ на изобретения, промышленные образцы и полезные модели.

3. Сформулированы рекомендации по компоновке машин с ПРЗ, выбору базового шасси и расположению кабины (места оператора) для КГМ, работающих на РЗМ. Для ряда тракторов и грузовых автомобилей определены параметры ПРЗ узлами шасси и максимально достижимый уровень защиты при работе на РЗМ.

4. Даны рекомендации по повышению технической производительности КГМ, агрегатов на базе гусеничных тракторов и колесных грузовых автомобилей при установке ПРЗ, в том числе за счет изменения передаточных чисел трансмиссии и тяговых усилий пропорционально росту массы машины, связанному с установкой защиты. Использование этих рекомендаций по изменению базовых технических параметров, рассмотренных КГМ при заданных в диссертации условиях конкретной реальной РЗМ приводит к увеличению их производительности до 34 %.

5. Разработан метод проверки ПРЗ с использованием однородного изотропного плоского гамма-облучателя, позволивший существенно повысить вероятность обнаружения дефектов в защите.

**На защиту выносятся** (по совокупности научно-обоснованных технических решений) перечисленные выше основные результаты, имеющие научную новизну и практическую ценность.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается базовыми положениями фундаментальных законов физики, теоретической механики, адекватностью исходных посылок и уровнем допущений при математическом описании параметров КГМ для работы на РЗМ. Учетом теоретических и экспериментальных исследований основных центров РФ по созданию и проверке техники с ПРЗ, хорошей сходимостью полученных результатов с результатами значительного количества экспериментов на машинах и стендах, обширной апробацией результатов исследований в эксплуатации.

**Апробация и реализация результатов работы.** Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались в 1988...2020гг на заседаниях кафедр, НТС и НТК: ЧТЗ, НИИ АТТ, НИИСтали, ФГУП 15 ЦНИИ МО РФ, ЮУрГУ, ЧГАУ. В полном объеме работа докладывалась, обсуждалась и одобрена на заседаниях НТС и подразделений: ЧТЗ, НИИСтали, МВТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП 15 и 21 ЦНИИ МО РФ, ЮУрГУ, ЧГАУ, Академии гражданской защиты МЧС РФ (г. Химки). Результаты работы применены при создании специальной техники с 1986 по 2020 гг, в том числе созданной по государственным и отраслевым программам (темы «Памятка-1 и 2», «Ларец», «Рамка» и др):

1. Бульдозерных (БА) и бульдозерно-рыхлительных агрегатов (БРА) с ПРЗ: ДЗ-171.1КЗ и ДЗ-132-1КЗ, на ЧТЗ (были приняты на снабжение МО СССР).
2. Ряда тракторов с ПРЗ: Т-130 и Т-170, агрегатов на их базе; опытно-промышленных партий агрегатов на базе трактора ДЭТ-250, на ЧЗК, ЧТЗ.
3. Партий радиоуправляемых тракторов (с защитой блоков управления от радиации) и агрегатов на их базе Т-130МС (МСАДУ), Т10.32-8/9, БРА ДЭТ-250М2СБ1Р1, на ЧТЗ (были приняты к использованию МО СССР).
4. Партий тракторов и БРА на их базе для подразделений ГК «Росатом» с ПРЗ и под установку ПРЗ в эксплуатации, в том числе по ТЗ заказчика (1986...2020гг).
5. Полноразмерных макетов машин с защитой от радиации (для отработки и испытаний вариантов ПРЗ по заказу МО РФ), ПРЗ изделий 781 и 782 (опытные образцы), на ЧТЗ, разработчики ЧТЗ, НИИСтали, испытания РФЯЦ НИИТФ.
6. Автомобилей Урал-4320, Урал-53234 со специальной защитой, УралАЗ, ЧТЗ.
7. Погрузчика малогабаритного ПМГ12.01 с ПРЗ дистанционного управления (опытный образец, 2013...2015гг), ЧТЗ, ООО «Снег».
8. БРА со специальной защитой Б10М2С, Б12С.5020ЕН, на ЧТЗ, 2014...2020г.
9. Погрузчика ПК55С со специальной защитой по заказу УНИВ ВС РФ (опытный образец, 2018г), на ЧТЗ.

Техника по п. 1...4 принимала участие в различных работах на РЗМ, в том числе при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), по п. 7 изготавливалась по Гособоронзаказу МО РФ (2017г).

Методы, математические модели, методики расчета параметров КГМ с ПРЗ, результаты исследований использовались НИИСтали, ФГУП 15 ЦНИИ МО РФ,

РФЯЦ НИИТФ, ГК «Росатом» при проектировании и испытаниях специальных КГМ и введены в практику учебных процессов «ЮУрГУ» (НИУ) и КГУ.

Результаты работы также использовались на ЧТЗ при создании и модернизации серийной народнохозяйственной техники – тракторов классов 10...25 (типа Т10, Т15, ДЭТ) и агрегатов на их базе, в части выбора ряда параметров трактора и его рабочего оборудования, компоновки, усиления рамы, подвески и ходовой части.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 78 работ, в том числе монография, 44 научных статьи, из них 35 научных статей в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 33 патента РФ на изобретения, промышленные образцы и полезные модели. Основные положения диссертации содержатся в работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы, приложения. Содержит 350 страниц текста, включая 81 рисунок, 38 таблиц, список литературы из 277 наименований.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, приведено краткое описание научной проблемы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов.

**В первой главе** проведен анализ проблемы создания эффективной техники для работы на РЗМ, рассмотрены особенности эксплуатации, приводится обзор существующих методов расчета и проектирования машин с ПРЗ.

Значительный вклад в исследования вопросов применения, оптимизации параметров, разработки критериев и методов оценки эффективности КГМ внесли: К.А. Артемьев, В.И. Баловнев, А.В. Вихров, Ю.В. Гинзбург, В.В. Гуськов, А.В. Келлер, В.И. Костюченко, Г.О. Котиев, Е.Д. Львов, Б.Л. Магарилло, Б.М. Позин, Д.А. Чудаков, В.М. Шарипов, Н. Kositsu, O. Okodzaki, G. Tomas и др, в том числе с ПРЗ оператора - А. В. Виноградов, И.В. Горячев, В.А. Григорян, Н.Г. Гусев, С.В. Еремин, В. И. Журавлев, В. С. Козлов, Ю.П. Костенко, В.П. Машкович, А.Б. Милентьев, А.А. Панченко, Е.С. Фрид, G. Bell, G. Biro, H. Steinberg, S. Glestan, B. Prais, J. Briesmeister, K. McConnell, J. Turner, M. Wells, K. Akimas, M. Kazuhisa и др.

Основное развитие теория расчета и проектирования машин для работы на РЗМ получила после аварии на Чернобыльской АЭС. Первоначально такая техника с ПРЗ создавалась на основе требований к военной технике, полученных при испытаниях ядерного оружия. Однако дозы и спектры радиоактивного излучения у таких аварий существенно отличаются от характеристик ядерного взрыва, что и послужило основой разработки специальных требований к работе КГМ на РЗМ (опубликовано в «Рекомендациях по оборудованию и проверке биологической защиты транспортных, грузоподъемных и др. средств, предназначенных для

проведения работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС», материалах п/я В-2652, В-2968, А-1664, Р-6476, в/ч 12093, 52684-А, работах А.А. Панченко, Е.С. Фрида и др). В этих работах рекомендуется: осуществлять ПРЗ исходя из максимально возможного допустимого перегруза техники; снижение скоростей передвижения; назначать зону работы КГМ на РЗМ и формулировать предложения по эксплуатации машин после исполнения и проверки уровня защиты.

Позднее появились более точные методики и программы расчета машин для работы на РЗМ (Указания по расчету и проектированию противорадиационной защиты средств инженерного вооружения: машины инженерного вооружения – Кн. 2. – М.: МО СССР). Анализ особенностей использования машин на ЧАЭС и предложения по повышению их ПРЗ рассматриваются в работах А. В. Виноградова, В.П. Ковалева, А.Б. Милентьева и др. Разработан ряд программ расчета ПРЗ, в том числе серии РОЗ-ПРИЗ (НИИСтали) для решения уравнения переноса гамма-излучения (ГИ) в плоской многослойной геометрии методом дискретных ординат с блоком расчета защиты от РЗМ и стандартными таблицами защиты.

В настоящее время для расчета ПРЗ используются отечественные и зарубежные программные средства: «ЗАЩИТА-ПРОЕКТ» (разработчики АО «СПБАЭП» и НИИ «Физики СПбГУ»), программа ПРИЗ-2ПЛ (0) (разработчик НИИСтали), DOT3, DORT и ANISN (разработчик Oak Ridge National Laboratory), MCNP4B (разработчик Los Alamos National Laboratory) и др. Во всех этих программах уровень ПРЗ оператора определяется по модели защиты, разрабатываемой согласно чертежно-технической документации с подробной геометрической схемой машины. При этом расположение и габаритно-массовые параметры основных элементов конструкции машины (включая размещение экипажа) уже заданы. Изменение компоновки машины приводит к созданию новой модели защиты. Расчетные значения доз облучения и ПРЗ существенно (до 25%) отличаются от результатов натуральных испытаний.

Методы выбора и оптимизации параметров КГМ довольно полно отработаны в работах К.А. Артемьева, В.И. Баловнева, А.В. Вихрова, Ю.В. Гинзбурга, Б.М. Позина, Д.А. Чудакова и др, однако эти методы не позволяют в полной мере описать рациональные параметры КГМ для работы на РЗМ. Такая техника до сих пор, как правило, рассматривается как база для установки кабины с ПРЗ, без адекватной научной оценки влияния ПРЗ на изменение функциональных и экономических характеристик машины.

Наиболее близким к оценке эффективности машин с ПРЗ является системный подход к военной технике, при этом КГМ рассматривается в составе подразделения, выполняющего различные типовые задачи. У В.К. Давыдова оценка единичного образца по устанавливаемой заказчиком предельно допустимой (лимитной) цене, у Г.И. Головачева, В.В. Дулепы по минимальным удельным затратам с вероятностью

выполнения задачи не ниже требуемой, эти оценки используют вероятностный метод с экспертной формализацией и не определяют конкретные значения рациональных параметров машины.

Известные работы по созданию техники для работы на РЗМ, несмотря на их несомненную значимость, нуждаются в развитии, так как не позволяют с достаточной точностью и с минимальными затратами получить необходимые результаты. Это в первую очередь относится к анализу и выбору рациональных параметров машин на начальном этапе проектирования в зависимости от задач, стоящих при эксплуатации конкретной техники на РЗМ.

**Недостатки существующих методик, конструкций и рекомендаций по созданию КГМ для работы на РЗМ (по известным предыдущим работам):**

1. Расчет и оценка связи ПРЗ с техническими параметрами машины, особенно на начальном этапе проектирования, малоизучены. Существующие методики расчета и проектирования машин с защитой от ГИ не содержат конкретной информации влияния ПРЗ на характеристики КГМ и эффективность ее работы на РЗМ, в том числе зависимости габаритно-массовых и защитных параметров ПРЗ оператора, увязанные с назначением и компоновкой машины.

2. Отсутствие достаточных научных обоснований и научно-обоснованных технических решений приводит не только к пониженной эффективности такой техники, нерациональным ее параметрам, но и к существенным ошибкам в методологии расчета и проектирования.

Повышение эффективности такой техники, основанное на развитии одного какого-либо параметра (уровень ПРЗ, техническая производительность, мощность, скорость, грузоподъемность...), нерационально.

3. Разработка машины с ПРЗ оператора сводится по существу к разработке ряда конструкций на основе опыта разработчика. Такой подход требует значительных трудозатрат и не гарантирует получения оптимального решения.

Методики расчета не позволяют оценить уровень защиты оператора без довольно подробной компоновочной схемы – данных по расположению и габаритно-массовым параметрам всех основных металлоемких узлов машины.

Выбор ряда рациональных основных технических параметров КГМ для работы на РЗМ невозможен без оценки влияния на них ПРЗ, в том числе на смещение центра масс (ЦМ), центра давления (ЦД) машины, значения тяговых характеристик, нагрузок, коэффициента буксования, прочностную надежность и, в конечном счете, непосредственно на производительность техники.

4. Рекомендуемые конструкции ПРЗ и технология изготовления защитных кабин имеет ряд недостатков как по защите (пониженный уровень защиты в местах соединения стенок, накопление радиоактивной пыли в теплоизоляции и т.д.), так и по безопасности их изготовления.

5. Экспериментальные методы оценки уровня ПРЗ на известных установках «Имитатор» и «Арка» с применением точечного источника излучения не позволяют с высокой долей вероятности выявлять все значимые дефекты защиты и требуют значительных финансовых и временных затрат.

**Во второй главе** рассматривается новая обобщенная структурная схема связей, влияющих на эксплуатацию техники с ПРЗ, приведены параметры и характеристики базового шасси, взаимосвязанные с параметрами ПРЗ машины. Показаны основные этапы и предлагаемая методика расчета получения максимальной эффективности КГМ на РЗМ.

**В основе методологии проводимого исследования** лежит рассмотрение ПРЗ как подсистемы машины (рис. 1), влияющей на другие основные параметры и характеристики КГМ в процессе комплексного расчета и выбора рациональных параметров работающей на РЗМ техники отдельными взаимосвязанными процедурами уже на начальном этапе проектирования при минимуме исходных данных. Машина с ПРЗ с точки зрения методики расчета – сложная техническая система. Как правило, рассмотрение такой системы оценивается по эффективности. В ряду задач, стоящих перед разработчиком, эта оценка осуществляется совместным решением задач более низкого уровня (например, последовательно – расчет необходимой защиты от ГИ шасси, кабиной, рабочим оборудованием; выбор технических параметров машины в зависимости от рассчитанной ПРЗ; оценка эффективности машины для конкретных условий работы и т.д.).

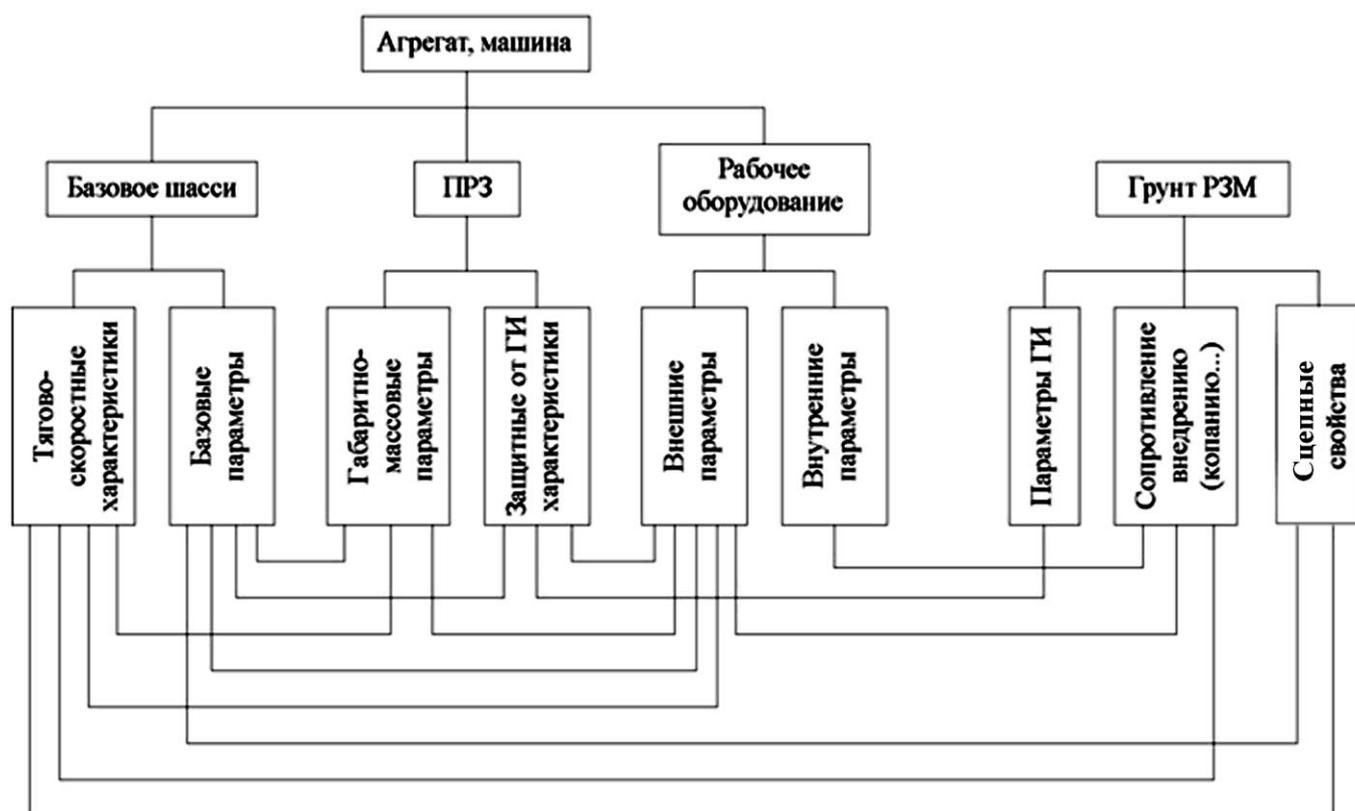


Рис. 1. Обобщенная структурная схема связей, влияющих на эффективность техники на РЗМ

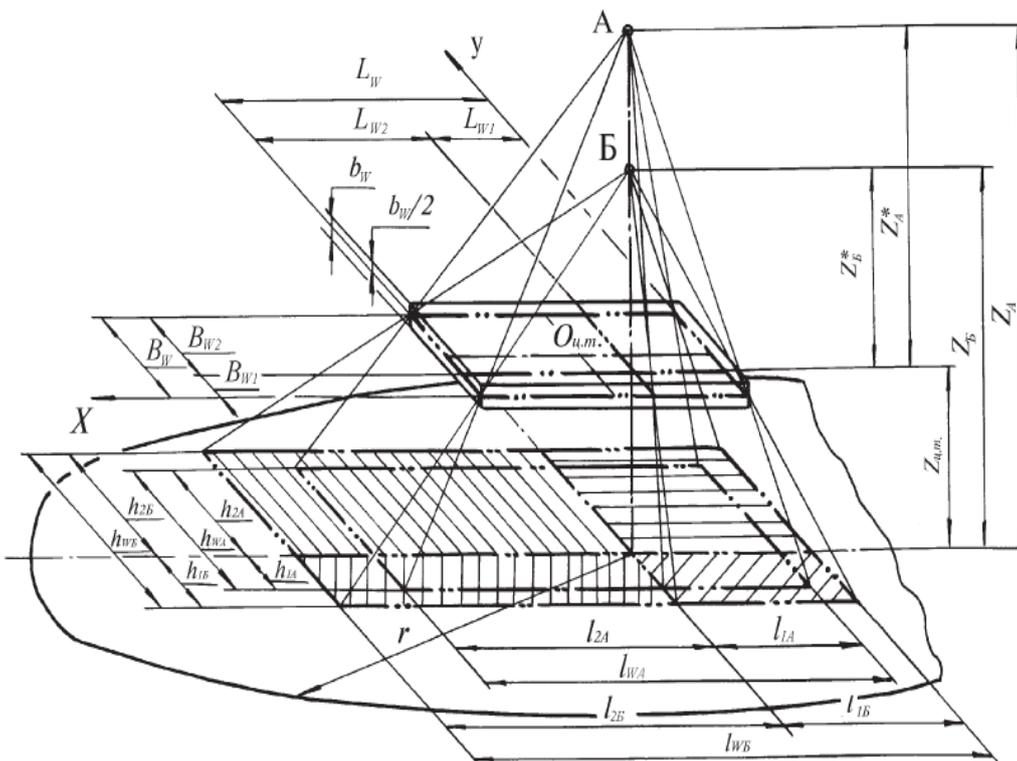
Эффективность машины в общем виде включает в себя две составляющие: результативность (производительность) и экономичность (затраты). На эти параметры существенно влияет ПРЗ, и чем выше уровень излучения, тем значительнее это влияние. Эффективность машины на РЗМ определяется векторными критериями, элементы которого – функции параметров машины и поля ГИ, а задача оптимизации – стандартная зависимость, где максимальная эффективность в общем виде определяется производительностью ( $\Pi$ ), временем работы на РЗМ ( $T$ ) и приведенными затратами на единицу выполненной работы ( $З$ ):

$$\max \mathcal{E} = f(\max \Pi, \max T, \min З). \quad (1)$$

Задача оптимизации КГМ по эффективности на конкретной РЗМ заключается в определении и установке рациональной ПРЗ, а также изменении (до рациональных) зависящих от ПРЗ значений базовых параметров и характеристик (производительность, масса, тяга, скорость...). Независящие (неизменяемые) базовые параметры становятся заданными (согласно параметрам базовой машины).

**В третьей главе** показаны основные этапы расчета ПРЗ машины.

Оценка влияния шасси машины на ПРЗ оператора от поля ГИ. Общая схема для расчета ПРЗ шасси машины (на примере трактора) приведена на рис. 2. Защитный экран шасси «трактор» – стальной параллелепипед с размерами по длине и ширине, равными соответствующим размерам самого шасси, с толщиной, приведенной к размерам шасси и массе узла, с положением центра масс, совпадающим с центром шасси (модель шасси «автомобиль» по защите от ГИ приведена в диссертации). Проекции точек  $A$  (уровень головы оператора) и  $B$  (уровень живота оператора) находятся на оси в центре поля ГИ.



**Рис. 2.** Схема к расчету влияния шасси «трактор» на уровень ПРЗ оператора, где  $r$  – радиус поля РЗМ;  $L_w$ ,  $B_w$ ,  $b_w$  – размеры защитного экрана;  $Z$  – расстояния по высоте до расчетных точек ( $Z_A$ ,  $Z_B$ ) или центра тяжести защитного экрана  $Z_{ЦТ}$ ;  $h$ ,  $l$  – размеры зоны РЗМ, перекрытой шасси

Тогда по правилу аддитивности (мощность дозы равна сумме мощностей доз всех ее составных частей), мощность дозы поля излучения в заданных точках формируется излучением из двух условных зон (рис. 2) – не перекрытой (незаштрихованная зона,  $P_0 - P_1$ ) и перекрытой (заштрихованная зона,  $P_2$ ) шасси. При этом из схем расчета (рис. 1, 2) получена формула (2) кратности ослабления ( $K_w$ ) ГИ узлами шасси в расчетной точке, где функционалы  $\Phi$  вычисляются по формулам (3...4):

$$K_w = \frac{P_0}{(P_0 - P_1) + P_2} = \frac{\pi \ln \frac{r^2 + z_i^2}{z_i^2}}{\pi \ln \frac{r^2 + z_i^2}{z_i^2} - \sum_{j=1}^k \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}) + B_\delta^q \sum_{j=1}^k \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}; \mu b_w)} \quad (2)$$

где:  $P_0$  – мощность дозы ГИ источника РЗМ в виде диска;  $P_1$  – мощность дозы ГИ прямоугольного источника из зоны, перекрытой шасси;  $P_2$  – мощность дозы ГИ из зоны за защитным экраном, перекрытой шасси;  $r$  – радиус поля излучения;  $j$  – индекс (относительные габаритные параметры) соответствующей части зоны;  $B_\delta^q$  – дозовый фактор накопления;  $i$  – индекс заданной точки.

Мощность дозы из перекрытой шасси зоны (рис. 2) можно рассчитать, разбив эту зону на прямоугольники с проекцией расчетной точки в одном из углов прямоугольника (рис. 3) по формулам (3, 4), вывод формул приведен в диссертации.

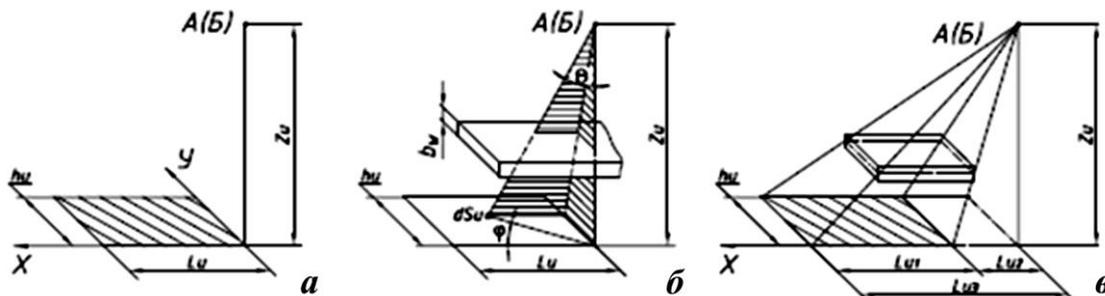


Рис. 3. Схемы к расчету мощности дозы ГИ в точке А(Б): а - от плоского прямоугольного источника; б - от прямоугольного источника за защитным экраном; в - пример деления площади излучения на прямоугольники с вершиной, совпадающей с проекцией расчетной точки ( $S_1 = S_3 - S_2$ )

Мощность дозы ГИ в точке А (Б) из зоны перекрытой защитным экраном (рис.3а).

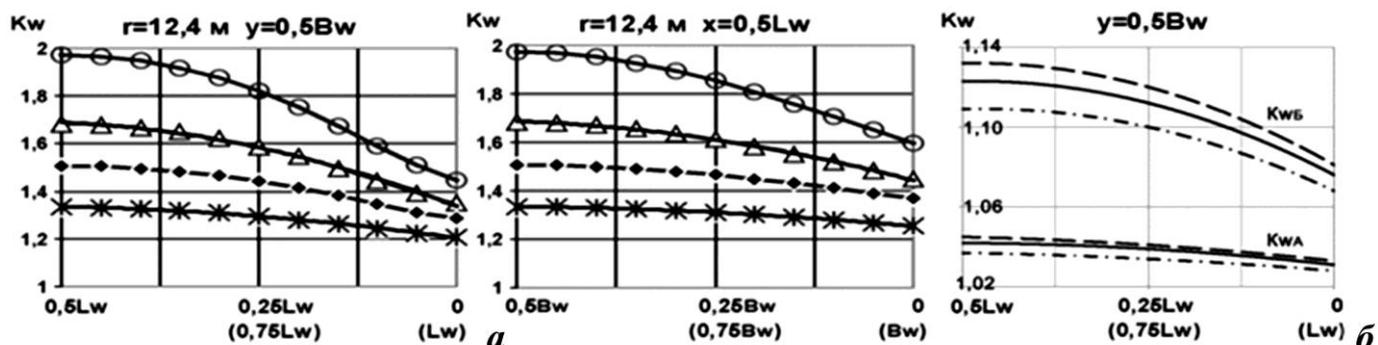
$$P_1 = P_\gamma \sigma \left\{ \int_0^n \frac{m}{\sqrt{1 + \psi^2 m^2}} \arctg \frac{m}{\sqrt{1 + \psi^2 m^2}} d\psi \right\} = P_\gamma \sigma \Phi(m, n) \quad (3)$$

Мощность дозы ГИ в точке А (Б) из зоны перекрытой защитным экраном с приведенной толщиной  $b_w$  (рис.3б) вычисляется:

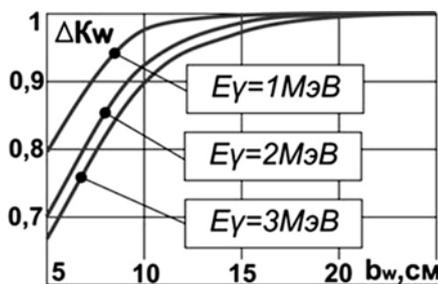
$$P_{2i} = P_\gamma \sigma B_\delta^q \left\{ \int_0^{\arctg(n)} d\varphi \int_0^{m \cdot \sec \varphi} \operatorname{tg} \theta e^{-\mu b_w \sec \theta} d\theta + \int_{\arctg(n)}^{\pi/2} d\varphi \int_0^{m n \cdot \cos \varphi} \operatorname{tg} \theta e^{-\mu b_w \sec \theta} d\theta \right\} = P_\gamma \sigma B_\delta^q \Phi(m; n; \mu b_w) \quad (4)$$

где  $P_\gamma$  – гамма – постоянная радиоактивного изотопа;  $n = h_u / l_u = B_{wi} / L_{wi}$  – относительные размеры источника;  $\sigma$  – активность радионуклида;  $1/m = z_u / l_u$ ,  $\psi = y / l_u$  – относительные расстояния до заданной расчетной точки;  $e$  – основание натурального логарифма;  $\mu$  – коэффициент ослабления ГИ в защите;  $\theta$  – угол между нормалью и точечным источником излучения на диске.

Ряд зависимостей из расчета по формуле (2) показаны на рис. 4, 5. Положение кабины (оператора) относительно узлов базового шасси изменяет уровень ПРЗ: у колесных машин до 30%, у гусеничных машин до 50%. На рис. 5 показано влияние толщины защитного экрана шасси на изменение уровня защиты при различных  $E\gamma$ .



Трактор кл.10 \* т.А, △ т.Б  
Трактор кл.25 -♦- т.А, ○ т.Б

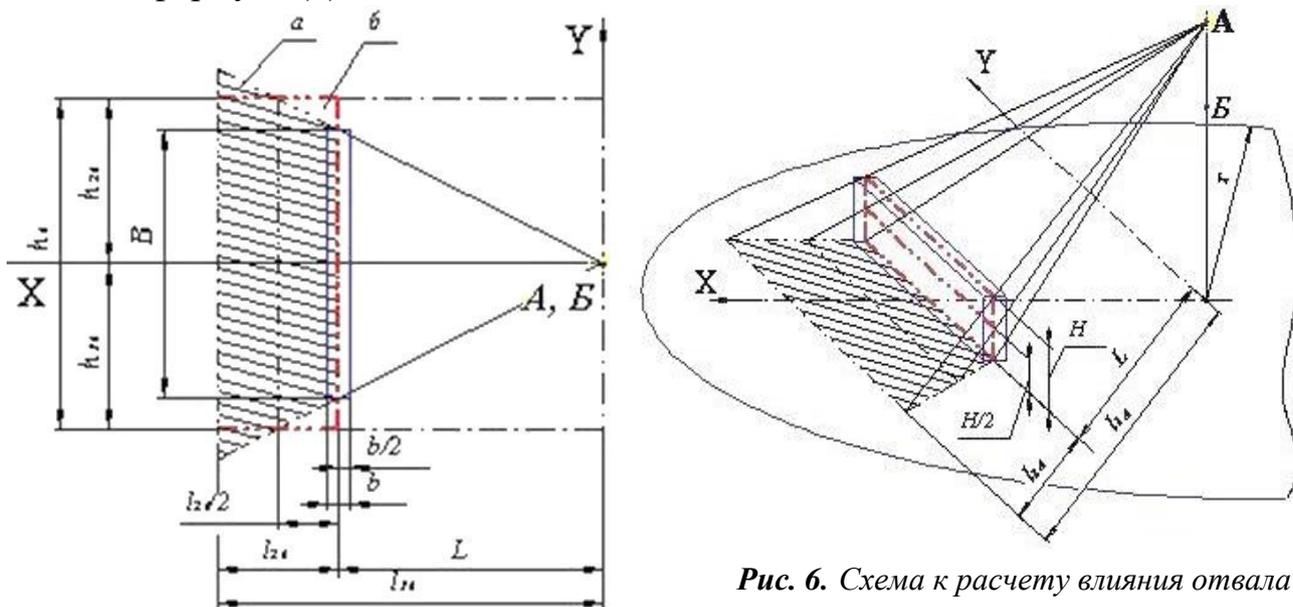


**Рис. 4.** Влияние места расположения оператора на уровень его ПРЗ  $E\gamma = 0,8\text{МэВ}$ : а – изменение положения по длине  $L_w$  и ширине  $B_w$  трактора кл. 10; б – изменение по длине  $L_w$  автомобиля при разных радиусах ГИ на грунте (---  $r = 9,75\text{м}$ , —  $r = 12,4\text{м}$ , - - -  $r = 20\text{м}$ )

**Рис. 5.** Зависимость уровня защиты оператора трактора кл. 10 от толщины защитного экрана шасси  $b_w$  при различных  $E\gamma$ , положение оператора  $y=0,5B_w$ ,  $PЗМ - r = 5,5\text{ м}$

Корректировка положения оператора, габаритно-массовых параметров защитного экрана, изменение числа расчетных зон позволяет оценить по формуле (2) влияние узлов шасси на ПРЗ любой КГМ. Расхождение с расчетом по ГОСТ В 26457 по компоновочной схеме не превышает 10%.

Уровень защиты оператора от ГИ грунта узлами рабочего оборудования рассчитан на примере бульдозерного отвала (рис. 6), используя методику расчета шасси по формуле (2).



**Рис. 6.** Схема к расчету влияния отвала бульдозера на уровень ПРЗ оператора от ГИ

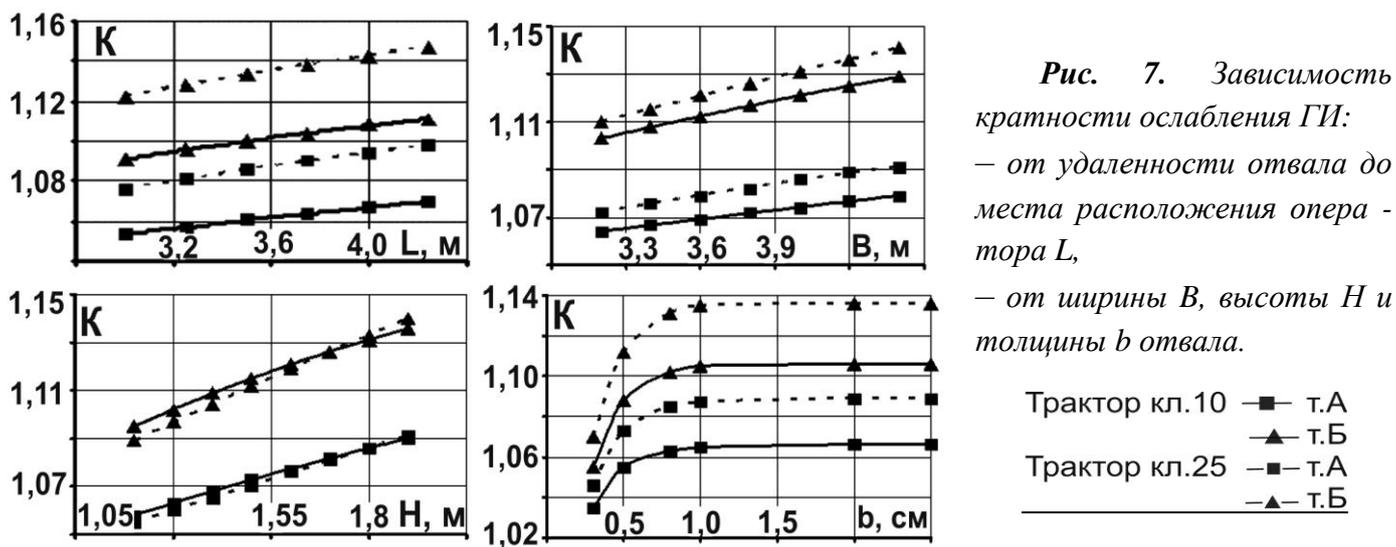
Защитный экран отвала представлен в виде стального параллелепипеда с приведенными размерами по длине, ширине и толщине  $b$ . Зону на грунте РЗМ (перекрытую отвалом) в виде трапеции заменяем подобным по площади и расположению прямоугольником с размерами  $l_2$  и  $h$  (рис.5). Площадь излучения, перекрытая защитным экраном отвала (заштрихованная зона), определяется как разность площадей прямоугольников с размерами  $l_{i1}, h_i$  и  $L, h_i$ .

На основании схем (рис. 3, 6), преобразуя формулы (2...4), получим формулу определения кратности ослабления дозы ГИ отвалом (др. рабочим оборудованием):

$$K = \frac{\pi \ln \frac{r^2 + z_i^2}{z_i^2}}{\pi \ln \frac{r^2 + z_i^2}{z_i^2} - \left[ \sum_{j=1,2} \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}) - \sum_{j=3,4} \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}) \right] + B_{\delta}^q \left[ \sum_{j=1,2} \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}; \mu b_w) - \sum_{j=3,4} \Phi_{ij}(m_{ij}; n_{ij}; \mu b_w) \right]}, \quad (5)$$

где  $j$  – индекс (относительные габаритные параметры) соответствующей части зоны.

Формула (5) показывает влияние расположения и габаритно-массовых параметров отвала (другого рабочего оборудования) на уровень ПРЗ оператора. Разница значений кратности ослабления излучений, рассчитанных по предлагаемой методике, и ГОСТ В 2645 составляет до 8%, что вполне приемлемо, и определяется наличием у оборудования неучтенных в методике скосов и выступающих углов. По формуле (5) проведен анализ влияния основных параметров отвала на уровень ПРЗ оператора (рис.7).



**Рис. 7.** Зависимость кратности ослабления ГИ: — от удаленности отвала до места расположения оператора  $L$ , — от ширины  $B$ , высоты  $H$  и толщины  $b$  отвала.

Трактор кл.10 —■— т.А  
—▲— т.Б  
Трактор кл.25 —■— т.А  
—▲— т.Б

Из расчетов по формуле (5) и анализа рис.7 можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение габаритных параметров высоты  $H$  и ширины  $B$  рабочего оборудования и удаление  $L$  рабочего оборудования от места расположения оператора приводит к практически линейному росту кратности ослабления излучения  $K$ . Наибольший относительный рост уровня защиты обеспечивает увеличение высоты отвала  $H$ . Меньшие значения ПРЗ оператора у отвала трактора

класса 25 по сравнению с классом 10 на графике  $K = f(H)$  при больших значениях  $L$  и  $B$  очевидно связаны с более высоким расположением оператора относительно грунта. При дальнейшем увеличении высоты отвала влияние этого фактора на уровень ПРЗ оператора уменьшается.

2. Увеличение толщины отвала  $b$  до 1 см (для  $E\gamma = 0,8\text{МэВ}$ ) приводит к увеличению уровня защиты оператора от ГИ грунта. Дальнейшее увеличение толщины практически не влияет на кратность ослабления ГИ, так как в этом случае определяющим становится излучение поля РЗМ из не перекрытой отвалом зоны.

3. При оценке ПРЗ оператора на основе реальных условий (размеров  $H, B, L$ ) по формуле (5) кратность ослабления отвалом не превышает 1,15 крат, что можно считать теоретически предельным уровнем ПРЗ оператора от ГИ грунта для любого вида рабочего оборудования меньшего размера (рыхлителя, лебедки и др.).

Определение и выбор ПРЗ узлами кабины и машины в целом. Уровень ПРЗ машины, работающей на РЗМ, в основном определяется защитной кабиной с учетом ПРЗ шасси и рабочего оборудования. Взаимосвязь между основными параметрами защитной кабины, характеристиками шасси и полем РЗМ показана на рис. 8. Диапазон допустимых значений массы ПРЗ в первую очередь определяется допустимой нагрузкой на шасси и местом установки защиты у конкретных КГМ.



**Рис. 8.** Схема зависимости защиты экипажа от основных параметров машины и характеристик источника ГИ

Задачу оптимизации массы кабины по объему можно сформулировать следующим образом: при заданном, необходимом для размещения экипажа и оборудования, внутреннем объеме площадь поверхности стенок кабины должна быть минимальна. С учетом допущений по форме кабины этому требованию удовлетворяет кабина в форме куба, из системы уравнений (приведенных в

диссертации) получена формула для расчета толщины стенок кабины с дифференцированным уровнем защиты (с разной толщиной стенок):

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 = \frac{6b}{1 + \sum_{i=2}^6 c_i} = \frac{6 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{V_{BH}}{27} + \frac{M_k}{12\rho} + \sqrt{\frac{V_{BH}M_k}{162\rho} + \frac{M_k^2}{144\rho^2}} + \sqrt[3]{\frac{V_{BH}}{27} + \frac{M_k}{12\rho} - \sqrt{\frac{V_{BH}M_k}{162\rho} + \frac{M_k^2}{144\rho^2}} - \frac{2\sqrt[3]{V_{BH}}}{3}} \right)}{1 + \sum_{i=2}^6 c_i} \\ b_i = c_i \cdot b_1 \end{array} \right. , (6)$$

где  $i$  – порядковый номер стенки;  $M_k$  – масса кабины, входящая в допустимый интервал по грузоподъемности;  $V_{BH}$  – внутренний объем кабины;  $\rho$  – плотность ПРЗ стенок кабины.

Проверка различных защитных кабин с количеством операторов не более двух показала удовлетворительную сходимость рассчитанных по формуле (6) основных габаритно-массовых показателей с соответствующими параметрами реальных кабин (расхождение не более 10%). Зная толщину и материал защитных стенок, можно легко определить уровень ПРЗ различных проекций кабины от источников излучения с любого направления.

**В четвертой главе** на основании данных о параметрах ГИ РЗМ и уровня ПРЗ предложен алгоритм определения рациональных технических параметров КГМ при установке ПРЗ (передаточные числа трансмиссии, размеры рабочего оборудования и т.д.) и оценка эффективности работы машины на РЗМ.

**Техническая производительность машины на РЗМ может оцениваться только после определения необходимого уровня защиты оператора (массы ПРЗ и места ее установки).** Установка ПРЗ на КГМ, как правило, приводит к нежелательному смещению центров масс и давления от геометрического центра, при этом ухудшается взаимодействие движителя с грунтом (снижаются сцепные качества, тяговый КПД, растет сопротивление движению).

Влияние смещения ЦМ (за счет установки ПРЗ) на производительность рассмотрено на примере БА и БРА на базе гусеничных промышленных тракторов классов от 10 до 25, используемых на РЗМ.

Малое смещение ЦМ от середины опорной поверхности  $L$  ( $x \leq \pm 0,1L$ ) приводит:

– к росту сопротивления передвижению линейно – пропорционально увеличению веса машины:

$$\Delta R_f = R_{fM} - R_{fW} = f(G_M - G_W) = f G_{ПРЗ}, (7)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления передвижению,  $G_M$  и  $G_W$  – вес машины с ПРЗ и базы, без защиты, соответственно;  $G_{ПРЗ}$  – вес ПРЗ.

– к уменьшению удельных тяговых усилий машины на величину прироста  $f$

$$\frac{\varphi_k}{\varphi_w} = f \frac{G_{ПРЗ}}{G_w}, (8)$$

где  $\varphi_k$ ,  $\varphi_w$  – соответственно, удельное тяговое усилие машины (агрегата), базового шасси.

При увеличении массы на 25% (масса ПРЗ) и  $f = 0,08$  снижение удельного тягового усилия составляет 0,02 относительно базовой (без ПРЗ) машины, что приводит к падению производительности на 1%.

Формула (8) позволяет по максимальному тяговому КПД (определяемому  $\varphi_{\text{Копт}}$ ) выбрать оптимальные передаточные числа трансмиссии  $i_{\text{прМ}} = i_{\text{прW}}(1 + M_{\text{ПРЗ}}/M_{\text{W}})$ .

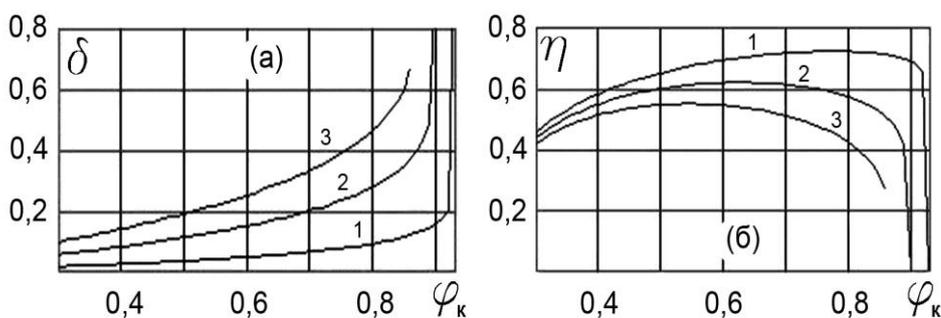
Для агрегатов с механической трансмиссией оптимальному КПД соответствует  $\varphi_{\text{Копт}} = 0,7$  (на грунте II категории), с электромеханической трансмиссией –  $\varphi_{\text{Копт}} = 0,41 \dots 0,81$ . Следует отметить, что экстремум производительности и расхода топлива на  $1 \text{ м}^3$  разработанного грунта достигается при одних и тех же тяговых усилиях, т.е. оптимизируя параметры БА и БРА по производительности, мы оптимизируем их и по расходу топлива (Б.М. Позин, В.И. Костюченко).

Значительное смещение ЦМ машины приводит к существенному падению тягового КПД (сопротивление движению начинает увеличиваться в параболической зависимости). Подобный эффект (при смещении полюса давления в процессе работы) рассматривался Ю.В. Гинзбургом и др.

В работе уточнена аналитическая зависимость буксования от тягового КПД для гусеничных машин в части значений показателя степени  $\beta$  (у Ю.В. Гинзбурга и др.  $\beta = 0,05$ ) и параметра  $\Delta\varphi_k$ , характеризующего снижение максимального тягового усилия из-за смещения полюса давления при установке ПРЗ:

$$\delta = 1 - \left( 1 - \frac{\varphi_k}{\varphi_{k \cdot \max} - \Delta\varphi_k} \right)^\beta. \quad (9)$$

Для определения характера кривой буксования и тягового КПД (рис. 9) в случае преднамеренного, конструктивно заложенного смещения ЦМ (полюса давления) проведен поиск коэффициентов аппроксимации. Результатам смещения ЦМ на 0,1 м, 0,2 м и 0,35 м, соответствуют значения коэффициента  $\beta = 0,05; 0,15; 0,25$ , при этом  $\Delta\varphi_k = 0,07; 0,10; 0,13$  (рис. 9б).

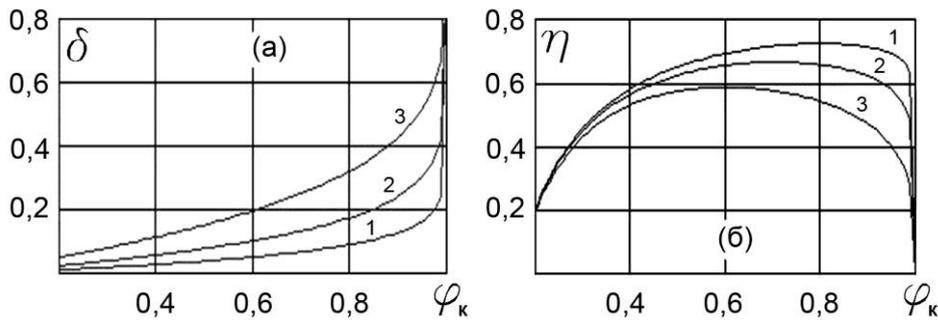


**Рис. 9.** Коэффициент буксования (а) и тяговый КПД (б) гусеничного промышленного трактора с ПРЗ при смещении ЦМ от геометрического центра машины на 0,1 м (1), 0,2 м (2), 0,35 м (3)

Для колесных машин уточнено значение показателя степени  $\zeta$  в аналитической зависимости буксования с тяговым КПД (у Ю.В. Гинзбурга и др  $\zeta = 0,1$ ):

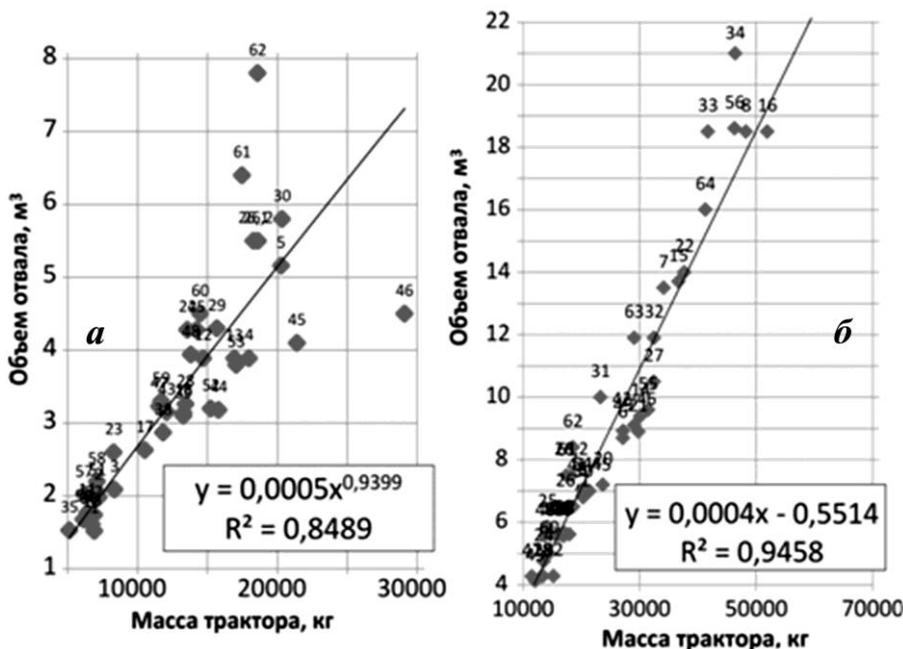
$$\delta = 1 - \left( 1 - \frac{\varphi_k}{\varphi_{k \cdot \max}} \right)^{\zeta \left( 1 + \frac{\varphi_k}{\varphi_{k \cdot \max}} \right)}. \quad (10)$$

Установлено, что смещению полюса давления, связанного с изменением положения ЦМ на 0,1; 0,2 и 0,35 м соответствуют значения коэффициента  $\xi = 0,05$ ; 0,1 и 0,15 соответственно. Графики буксования и снижения тягового КПД при смещении ЦМ на 0,1; 0,2 и 0,35 м показаны на рис. 10.



**Рис 10.** Коэффициент буксования (а) и тяговый КПД (б) колесной машины с ПРЗ при смещении ЦМ от геометрического центра машины на 0,1 м (1), 0,2 м (2), 0,35 м (3)

На графиках тягового КПД (рис. 9...10) видно существенное снижение максимума функции относительного тягового усилия при увеличении смещения ЦМ (ЦД). Для увеличения тягового КПД КГМ с ПРЗ необходимо соответствующее влиянию ПРЗ увеличение передаточного числа трансмиссии. Для повышения производительности БРА необходимы соответствующие установке ПРЗ изменения параметров отвала, приведенные в диссертации, в том числе его объема (рис. 11).



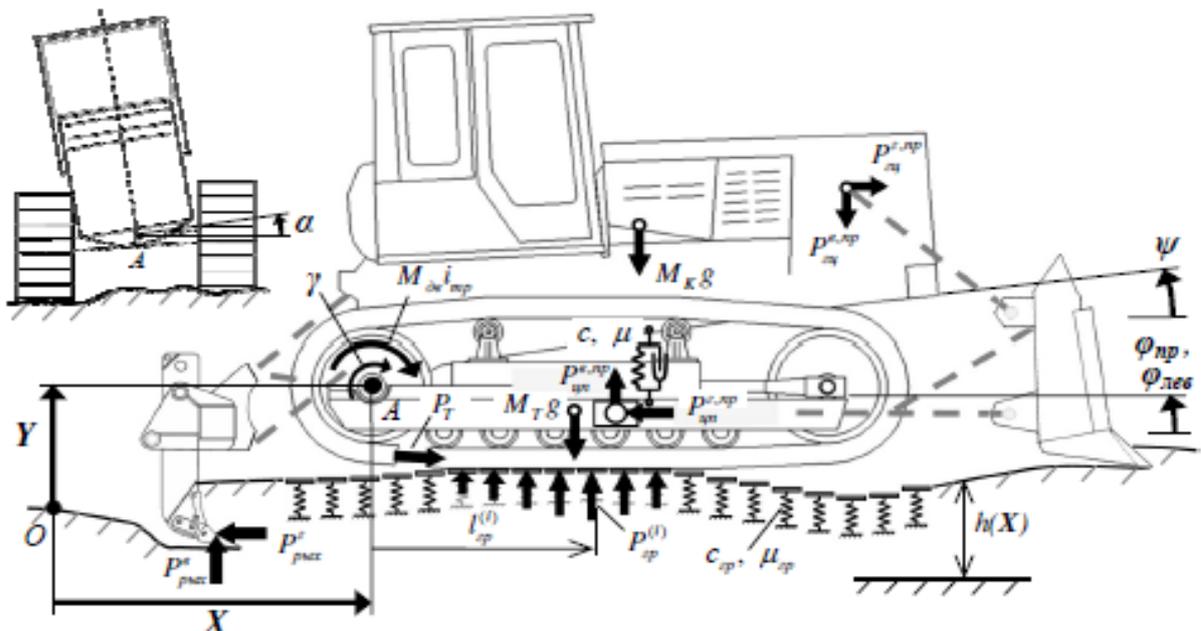
**Рис. 11.** Расчетно – экспериментальная зависимость (полученная автором) объема отвала от изменения конструкционной массы трактора, в том числе при установке ПРЗ:

а – прямой отвал,

б – полусферический отвал.

Формулы расчета объема отвала и коэффициент корреляции Пирсона ( $R^2$ ) для каждого типа отвала прописаны на графиках

**4.3. Прочностная надежность гусеничного БРА с ПРЗ.** Установку ПРЗ также необходимо учитывать при прочностных расчетах КГМ. Рассмотрим трактор с ПРЗ в составе БРА. БРА как объект моделирования динамических процессов представляет собой связную, существенно нелинейную систему, испытывающую многопараметрическое случайное воздействие внешней среды при выполнении технологического процесса (транспортный и рабочий режимы нагружения). Предлагаемая математическая модель такой системы, разработана совместно с Березиным И.Я. и Халтуриным В.К. (рис. 12, математическая модель – система 11).



**Рис. 12.** Схема нагружения БРА на базе гусеничного промышленного трактора в процессе эксплуатации (влияние массы ПРЗ и ее смещения относительно ЦМ базы учитывается в значении тяговых усилий, нагрузок, а также в значении показателя степени буксования)

Система дифференциальных уравнений (11) прямолинейного движения промышленного трактора с полужесткой подвеской составлена с применением процедуры Лагранжа второго рода с дополнительными (избыточными) координатами. В качестве обобщенных координат приняты горизонтальная  $X$  и вертикальная  $Y$  координаты оси ведущего колеса, углы поворота корпуса трактора  $\psi$  и гусеничных тележек  $\varphi_{np}$ ,  $\varphi_{лев}$  в продольной вертикальной плоскости, угол поворота корпуса трактора в поперечной вертикальной плоскости  $\alpha$ , угол поворота осей ведущих колес  $\gamma$ . Обозначения других параметров на рис. 12.

Особенности математической модели (11) состоят в учете факторов:

- двухвходового внешнего воздействия в виде силового нагружения со стороны рабочего органа и кинематического со стороны случайного профиля дороги на ходовую систему; особенностей полужесткой подвески, характерной для конструкций промышленных тракторов; буксования гусеничного движителя;

- влияния массы ПРЗ и ее смещения относительно ЦМ базы, учтено в значениях тяговых усилий и нагрузок, а также показателя степени буксования  $\beta$  в уравнении (11.7), определяемом из условий формулы (9), данное уравнение, описывающее дополнительные неголономные связи, обуславливает появление избыточных координат.

Помимо дифференциальных уравнений (11.1-11.6), определяющих движение БРА и буксование (11.7), в системе учтена нелинейность характеристики поддресоривания, возможность замыкания балки подвески на упоры рамы трактора (пробой подвески) – система (11.8), где  $\vartheta$  – угол поворота корпуса трактора относительно тележек, при котором происходит это замыкание.

$$M_T \left[ 2\ddot{Y} + \frac{1}{2} L_T (\ddot{\varphi}_{np} + \ddot{\varphi}_{лев}) \right] + M_K \left[ \ddot{Y} + \frac{1}{2} L_K \ddot{\psi} \right] + (2M_T + M_K) g = F; \quad (11.1)$$

$$\frac{M_T b}{4} \left[ L_T (\ddot{\varphi}_{np} - \ddot{\varphi}_{лев}) + 2b^2 \ddot{\alpha} \right] + (J_K^x + 2J_T^x) \ddot{\alpha} = F^{<1>;} \quad (11.2)$$

$$\frac{M_T L_T}{4} (2\ddot{Y} + 2g + b\ddot{\alpha} + L_T \ddot{\varphi}_{np}) + J_T^z \ddot{\varphi}_{np} + \frac{C_P L_P^2}{4} \left( \varphi_{np} + \varphi_{лев} - 2\psi + \frac{2a}{L_P} \right) + \frac{\mu_P L_P^2}{4} (\dot{\varphi}_{np} + \dot{\varphi}_{лев} - 2\dot{\psi}) = F^{<2>;} \quad (11.3)$$

$$\frac{M_T L_T}{4} (2\ddot{Y} + 2g - b\ddot{\alpha} + L_T \ddot{\varphi}_{лев}) + J_T^z \ddot{\varphi}_{лев} + \frac{C_P L_P^2}{4} \left( \varphi_{np} + \varphi_{лев} - 2\psi + \frac{2a}{L_P} \right) + \frac{\mu_P L_P^2}{4} (\dot{\varphi}_{np} + \dot{\varphi}_{лев} - 2\dot{\psi}) = F^{<3>;} \quad (11.4)$$

$$\frac{M_K L_K}{2} \left( \ddot{Y} + g + \frac{L_K \ddot{\psi}}{2} \right) + J_K^z \ddot{\psi} - C_P L_P^2 \left( \varphi_{np} + \varphi_{лев} - \frac{\psi}{2} + \frac{a}{L_P} \right) - \frac{\mu_P L_P^2}{2} (\dot{\varphi}_{np} + \dot{\varphi}_{лев} - 2\dot{\psi}) = F^{<4>;} \quad (11.5)$$

$$J_{np} \dot{\gamma} = M_{\delta\epsilon} i_{np} - P_T r_{\epsilon k}; \quad (11.6)$$

$$\frac{\dot{\gamma} r_{\epsilon k} - \dot{X}}{\dot{\gamma} r_{\epsilon k}} = 1 - \left( 1 - \frac{\varphi_{kp}}{\varphi_{kp \max}} \right)^\beta; \quad (11.7)$$

$$C = \begin{cases} C_1, & \text{если } \varphi_{np} - \psi > \vartheta_0 \text{ или } \varphi_{лев} - \psi > \vartheta_0 \\ C_2, & \text{если } \varphi_{np} - \psi < \vartheta_0 \text{ и } \varphi_{лев} - \psi < \vartheta_0 \end{cases}, \quad (11.8)$$

где

$$F = P_{\psi n}^{\epsilon, np} + P_{\psi n}^{\epsilon, лев} - P_{z\psi}^{\epsilon, np} - P_{z\psi}^{\epsilon, лев} + \sum_i P_{zр, np}^{(i)} + \sum_i P_{zр, лев}^{(i)};$$

$$F^{<1>} = \frac{b}{2} \left[ \left( P_{\psi n}^{\epsilon, np} - P_{\psi n}^{\epsilon, лев} \right) - \left( P_{z\psi}^{\epsilon, np} - P_{z\psi}^{\epsilon, лев} \right) + \left( \sum_i P_{zр, np}^{(i)} - \sum_i P_{zр, лев}^{(i)} \right) \right];$$

$$F^{<2>} = P_{\psi n}^{\epsilon, np} x_T - P_{\psi n}^{\epsilon, лев} y_T + \sum_i P_{zр, np}^{(i)} l_{zр}^{(i)}; \quad M^{<3>} = P_{\psi n}^{\epsilon, лев} x_T - P_{\psi n}^{\epsilon, лев} y_T + \sum_i P_{zр, лев}^{(i)} l_{zр}^{(i)};$$

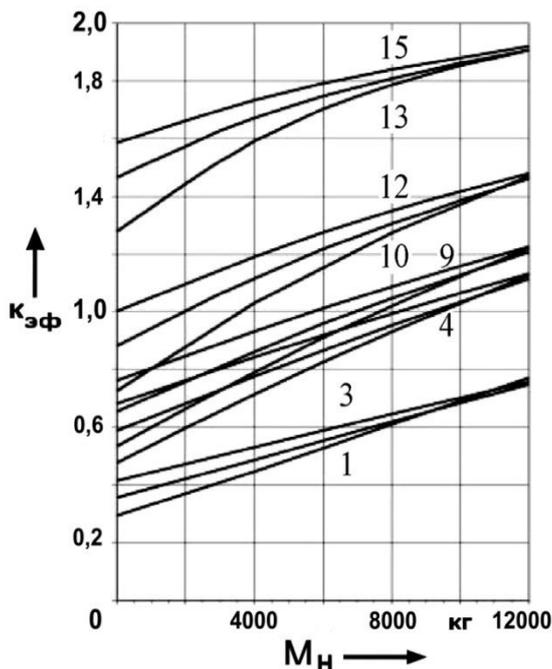
$$F^{<4>} = - \left( P_{z\psi}^{\epsilon, np} + P_{z\psi}^{\epsilon, лев} \right) x_K - \left( P_{z\psi}^{\epsilon, np} + P_{z\psi}^{\epsilon, лев} \right) y_K$$

Представленная математическая модель (11) применяется для прогнозирования динамических процессов, возникающих в условиях, близких к реальной эксплуатации БРА с ПРЗ. Моделирование напряженно-деформированного состояния трактора по указанной модели позволяет определять уровни напряженности в наиболее нагруженных зонах, в том числе на начальном этапе проектирования.

Целесообразность использования грузового автомобиля с ПРЗ в режиме полного привода. Введен коэффициент эффективности трансмиссии  $K_{эф}$  (совместно с И.В. Докшиным и А.В. Келлером) как отношение потерь мощности на проскальзывание колес при неполноприводной схеме  $N_{доп\ неполн}$  к потерям мощности при полном приводе  $N_{доп\ полн}$  :

$$K_{эф} = N_{доп\ неполн} / N_{доп\ полн} . \quad (12)$$

Величина этого коэффициента есть критерий целесообразности выбора колесной формулы проектируемого автомобиля. При  $K_{эф} < 1$  включение переднего моста нерационально, так как потери мощности при полноприводной схеме больше, чем при неполноприводной, а при  $K_{эф} > 1$  наоборот. Результаты расчетов коэффициента эффективности трансмиссии  $K_{эф}$ , в зависимости от увеличения массы автомобиля  $M_H$  за счет ПРЗ и массы перевозимого груза показаны на рис. 13.



**Рис. 13.** Зависимость коэффициента  $K_{эф}$  эффективности трансмиссии самосвала (на примере КАМАЗ – 6522) от массы автомобиля с нагрузкой  $M_H$  (масса ПРЗ + масса груза) при различном сопротивлении качению:

- 1 – 3 – движение по асфальтобетону ( $f = 0,022$ );
- 4 – 6 – движение по щебеночному шоссе ( $f = 0,032$ );
- 7 – 9 – движение по укатанному снегу ( $f = 0,035$ );
- 10 – 12 – движение по грунту ( $f = 0,045$ );
- 13 – 15 – движение по размокнутому грунту ( $f = 0,08$ );
- 1, 4, 7, 10, 13 – масса автомобиля 10400 кг;
- 2, 5, 8, 11, 14 – масса автомобиля 15500 кг;
- 3, 5, 8, 12, 15 – масса автомобиля 20700 кг

Поскольку масса ПРЗ однозначно определяется параметрами ГИ на РЗМ и расчетами из третьей главы (без подробной компоновочной схемы), то коэффициент эффективности трансмиссии  $K_{эф}$  позволяет определять рациональную колесную формулу проектируемого автомобиля уже на ранней стадии проектирования.

Технические параметры КГМ считаются с учетом математических моделей, разработанных автором, последовательно решаемых уравнений и рекомендаций. В общем виде алгоритм содержит следующие этапы:

- выбор базового шасси, максимально удовлетворяющего требованиям технического задания по эффективности с учетом защиты оператора от ГИ (производительность; грузоподъемность, для колесной машины – схема привода);
- определение рационального положения оператора на машине (с учетом ПРЗ) и расчет кратности ослабления ГИ узлами шасси и рабочего оборудования;

– расчет уровня защиты (толщины стенок) и массы кабины, исходя из уровня рациональной ПРЗ для конкретной РЗМ с учетом защиты оператора от ГИ узлами шасси и рабочего оборудования;

– выбор массы ПРЗ, исходя из уровня рациональной защиты для конкретной РЗМ и возможности ее установки по грузоподъемности (при необходимости перерасчет параметров ПРЗ, изменение компоновки, использование другой базы и др.);

– изменение параметров базовой машины (передаточного числа трансмиссии) и рабочего оборудования (объем отвала БА) в связи с ростом общей массы КГМ и положения ЦМ;

– расчет производительности для работы на конкретной РЗМ с учетом влияния дополнительной массы ПРЗ.

Оценка эффективности эксплуатации машин на РЗМ, в том числе влияние параметров машины на получение максимальной эффективности в заданных условиях. Оценка эффективности КГМ с ПРЗ осуществляется последовательно:

– расчет необходимой защиты от ГИ базовым шасси, кабиной, рабочим оборудованием;

– выбор технических параметров машины в зависимости от рассчитанной ПРЗ;

– оценка эффективности машины для конкретных условий работы и т.д.

При оценке эффективности параметров ПРЗ и машины учитываются три основных положения:

1. Уровень защиты от ионизирующих излучений (кратность ослабления ГИ узлами КГМ с ПРЗ) при любых условиях должен обеспечить оператору дозу не выше предельно допустимой дозы (ПДД), прописанной нормами радиационной безопасности и др;

2. Учет ограничений по тактико-техническим характеристикам машины и стоимости ряда ее узлов;

3. Расчет оценки эффективности машины на РЗМ проводится в направлении:

– расчет рациональной по критерию «эффект – затраты» ПРЗ и оценка вклада этой защиты в общую эффективность машины;

– определение общей эффективности машины суммированием оценки вклада ПРЗ и эффективности, связанной с изменениями параметров машины (производительности и затрат).

Эффективность использования машин с ПРЗ оператора при заданной ПДД определяется:

– характеристиками поля ГИ РЗМ (мощность и энергия дозы излучения);

– уровнем биологической защиты оператора;

– технической производительностью машины;

– общими затратами на машину (включая стоимость ПРЗ);

- продолжительностью смены (в т.ч. ввод и вывод машины из зоны работ).

Финансовые затраты на КГМ с ПРЗ условно можно разделить на четыре части: затраты на создание машины с обычной кабиной (без ПРЗ); эксплуатационные затраты; затраты на создание защитного экрана кабины; затраты на содержание оператора. Для упрощения оценки в расчетах эффективности первые две части затрат считаем условно постоянными (не зависящими от ПРЗ).

Затраты на создание защитного экрана кабины можно выразить в зависимости от затрат на покупку материала защиты  $Z_{ПРЗ}$ :

$$Z_3 = k_3 \cdot Z_{ПРЗ} = k_3 \cdot C_{ПРЗ} \cdot M_{ПРЗ} \quad (13)$$

где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий затраты на изготовление и установку кабины;  $C_{ПРЗ}$  – цена единицы массы ПРЗ;  $M_{ПРЗ}$  – масса ПРЗ.

Затраты на содержание оператора  $Z_{\Sigma O}$  включают в себя: затраты  $Z_o$  на обеспечение человеку нормальных условий существования (заработная плата, социальные выплаты и т.д.) и затраты  $Z_p$  на обеспечение мер по реабилитации ущерба, причиненного здоровью радиацией.

С учетом вышеизложенного получена формула оценки (сравнения) эффективности работы КГМ на РЗМ с учетом производительности, затрат на изготовление базовой машины и ПРЗ, эксплуатацию, содержание операторов, а также времени входа-выхода из зоны:

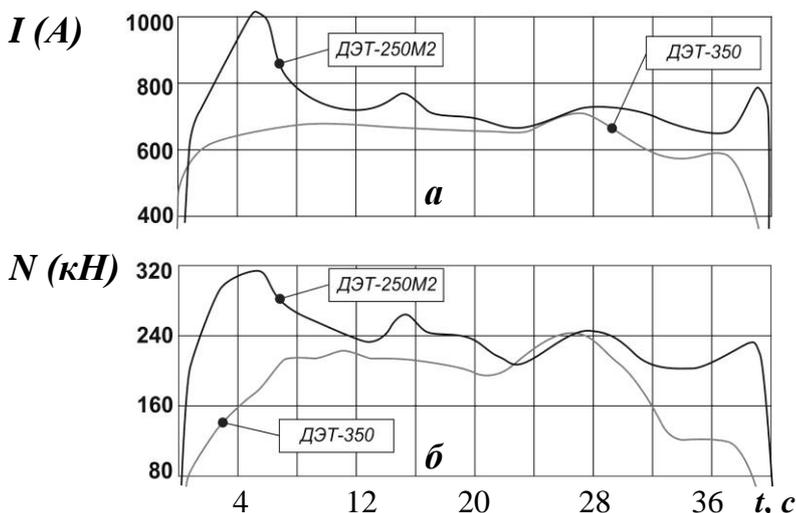
$$\mathcal{E}_{1-2} = \frac{\omega_{ч1}}{\omega_{ч2}} \left( \frac{Z_{w2} + Z_{э2} + Z_{з2} + Z_{\Sigma o2}}{Z_{w1} + Z_{э1} + Z_{з1} + Z_{\Sigma o1}} \right) \frac{T - n_{o1} T_{ВВ1}^*}{T - n_{o2} T_{ВВ2}^*}, \quad (14)$$

где  $\mathcal{E}_{1-2}$  – относительная эффективность машин; 1 и 2 – индексы, означающие первую и вторую машины;  $\omega_{ч}$  – производительность машины за час чистого времени работы;  $Z_w$  – затраты на создание машины с обычной кабиной, подобной по размерам и внутреннему оборудованию кабине с защитой от ГИ;  $Z_э$  – эксплуатационные затраты, зависящие от времени использования машин;  $T$  – время работы машины,  $n_o$  – количество работающих на машине операторов, исходя из ПДД;  $T_{ВВ}$  – время, затрачиваемое на ввод-вывод машины из зоны работ на исходную площадку.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментальной оценки основных параметров КГМ с ПРЗ. Проверка ПРЗ оператора проводилась в соответствии с ГОСТ В 23731 на установках «Имитатор» и «Арка» и с помощью плоского гамма-излучателя. Технические характеристики и параметры машин (испытания тяговые, на производительность, прочностные и др.) проверялись по соответствующим ГОСТ, РД и т.д. на полигонах ЧТЗ, МО РФ и др. В ходе испытаний:

Получены экспериментальные данные ПРЗ бульдозеров на базе тракторов Т-170, Т10 и ДЭТ-250М2, а также грузовых автомобилей ГАЗ-66, УРАЛ-4320, ЗИЛ-131. Расхождение между расчетами ПРЗ по предлагаемым методикам и экспериментом не превышало 13%, что вполне допустимо, учитывая погрешность измерений (до 10%).

Экспериментально подтверждена возможность увеличения технической производительности БА при установке ПРЗ за счет повышения тяги путем изменения передаточных чисел трансмиссии и емкости отвала пропорционально росту массы ПРЗ. Расхождение теоретической и экспериментальной оценки не превысило 9%. На рис. 14 приведен пример тяговых испытаний БРА с электромеханической трансмиссией, где изменение тягового усилия пропорционально силе тока якоря тягового электродвигателя.

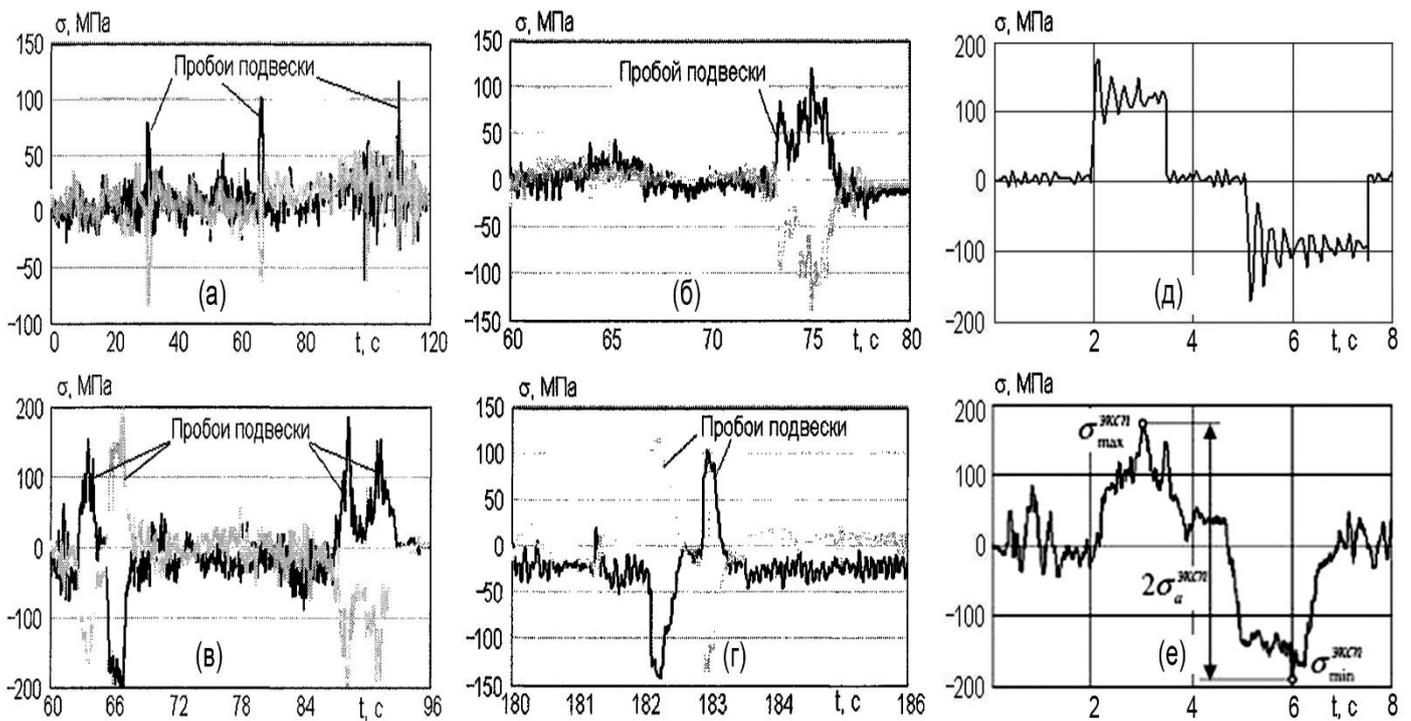


**Рис. 14.** Сила тока  $I$  (а) и тяговое усилие  $N$  (б) БРА на базе ДЭТ-250М2 и ДЭТ-350 (на базе ДЭТ-250М2, увеличение массы на 5265кг (подобно установке ПРЗ) и пропорциональное увеличение передаточного числа с 33,24 до 36,64) при разработке грунта III категории

Из рис. 14 видно, что для ДЭТ-250М2 начало набора призмы волочения (врезание в грунт) сопровождается резким падением скорости, ростом силы тока, увеличением тягового усилия до максимальных значений, ограничиваемых полным буксованием. Для ДЭТ-350 тяга плавно возрастает (среднее значение силы тока тягового электродвигателя БРА в траншее 654,4А, на 16,5% меньше, чем у ДЭТ-250М2), прежде всего за счет большей массы и передаточного отношения трансмиссии. Далее тяга ДЭТ-350 плавно возрастает и уменьшается в конце цикла при опорожнении отвала в конце рабочего хода. Недогруз ДЭТ-350 (по сравнению с ДЭТ-250М2) по силе тока (тяге) позволяет при работе на этих грунтах увеличить емкость отвала пропорционально увеличению массы БРА за счет установки ПРЗ.

Разработана методика испытаний ПРЗ с использованием однородного изотропного плоского гамма-облучателя, позволяющая быстро и качественно определять в свинцовой защите все дефекты глубиной свыше 5 мм.

Адекватность математической модели – системы (11) подтверждена испытаниями по определению напряженности отдельных узлов БРА (с имитацией изменения массы ПРЗ специальными грузами), максимальные напряжения до 9% отличаются от расчета. На рис. 15 приведены фрагменты осциллограмм напряжений корпуса трактора при реальной эксплуатации, где четко виден контакт рамы с упором подвески (пробой) обусловленный, в том числе, увеличением массы машины при установке ПРЗ. Совпадение расчетной и экспериментальной осциллограмм (рис. 15д,е) также показывает хорошую сходимость результатов.



**Рис. 15.** Напряжения в опасной зоне верхнего листа корпуса трактора Т10 при бульдозировании суглинка II категории (а), разборного каменного грунта (в), рыхлении (б), движении на 3 передаче (г), расчетные (д) и экспериментальные (е) напряжения в зоне верхнего листа корпуса рамы при пробое подвески

**В шестой главе** на базе проведенных исследований рассматриваются особенности расчета ряда практических инженерных задач и их решения для конкретных машин с ПРЗ. Показаны: алгоритмы расчета и выбора рациональных параметров КГМ на РЗМ в зависимости от конкретных задач; программы расчета параметров шасси, рабочего оборудования, уровня ПРЗ, эффективности конкретных КГМ, позволяющие исследовать и создавать технику с максимальной эффективностью для заданных условий РЗМ, оценивать и выбирать на стадии проектирования основные параметры таких машин.

**Предельный уровень ПРЗ оператора.** Предложенные методики позволили на начальной стадии проектирования получать максимально возможный уровень защиты оператора конкретных машин (таблица 1). По несущей способности ходовой части определяем допустимую массу дозагрузки шасси (90% этой массы используем для ПРЗ, 10% на усиление несущих конструкций).

Расчетный уровень защиты оператора (табл. 1) от ГИ грунта узлами шасси и рабочего оборудования (при его наличии) определялся по формулам (2) и (5), кабиной по толщине стенок из формулы (6). Расчетный максимальный уровень ПРЗ получен в соответствии с уровнем защиты его составляющих (шасси и кабины). Влияние ПРЗ на производительность (с учетом входа – выхода машины из зоны работ, связанного с ПДД оператора) и эффективность по сравнению с базой определялось из формулы (14).

Таблица 1

Влияние максимального уровня ПРЗ оператора (одноместная кабина с одинаковой толщиной стенок кабины из свинца,  $V_{вн}=1,12м^3$ ) на относительную производительность и эффективность машины в сравнении с базовой на разных РЗМ ( $E_{\gamma}=0,8МэВ$ , уровень ПРЗ кабины обеспечивает 6 часов работы оператора с ПДД=20 мЗв/год, вход-выход машины из зоны работ – 0,3 часа)

Базовые шасси	Параметры кабины		Предельный расчетный уровень ПРЗ оператора от ГИ на грунте, $K$ , крат			Мощн. дозы ГИ РЗМ, $R_{об}$ , мЗв/ч	Кол-во операторов, с ПРЗ / без ПРЗ кабины	$\frac{П_{ПРЗ}}{П_{баз}}$	Затраты $Z_{\Sigma 0}+Z_3 / Z_{\Sigma 0}$ (без ПРЗ), у.е. (1 у.е. = 63 руб на 01.07.19)	$\Delta i - Б$
	МАХ $M_{ПРЗ}$ , кг	Толщ. стенки $b_k$ , мм	Узлами шасси	$E_{\gamma}=0,8МэВ$ Кабина	Машина в целом					
<b>Гусеничный трактор под бульдозер, класс 10*<sup>1</sup></b>										
<b>T10M.0010</b> (5 <sup>ти</sup> - катковая тележка, колея 1880мм, ширина гусеницы 500мм)	5000	61	2,75	175	481	5,66	1 / * <sup>2</sup>	* <sup>2</sup>	42760 / * <sup>2</sup>	* <sup>2</sup>
<b>T10M.0050</b> (6 <sup>ти</sup> - катковая тележка, колея 2080мм, ширина гусеницы 690мм)	8100	93	2,93	3364	9857	116	1 / * <sup>2</sup>	* <sup>2</sup>	56834 / * <sup>2</sup>	* <sup>2</sup>
<b>Грузовые автомобили (оператор размещен на продольной оси машины)</b>										
<b>УРАЛ - 4320</b>	2790	35	1,90	15,63	29,7	0,35	1 / 16	<b>4,75</b>	32727 / 320940	<b>46,58</b>
<b>КамАЗ - 6522</b>	2320	30	2,03	9,50	19,3	0,23	1 / 10	<b>1,90</b>	30593 / 200578	<b>12,46</b>

\*<sup>1</sup> – единая база, за счет большей колеи, ширины гусеницы, грузоподъемности, более рационального расположения оператора у T10M.0050 по сравнению с T10M.0010 значительно выше максимальный уровень защиты. \*<sup>2</sup> – не имеет смысла, оператор серийной машины получит ПДД во время входа-выхода машины из зоны работ и у него не останется времени на работу

Результаты сравнительного тягового расчета бульдозеров с механической (МСТ) и электромеханической (ЭМТ) трансмиссией (смещение ЦМ < 10%) приведены в табл. 2 (увеличение массы в колонках 2 и 3 за счет установки ПРЗ).

Из табл. 2 видно, что выбор оптимальных передаточных чисел трансмиссии зависит от массы установленной ПРЗ. Например, для БА кл.10 с МТ на базе трактора T10 ( $\varphi_{Конм} = 0,7$  на грунтах II и III категории) при установке ПРЗ массой  $M_{ПРЗ} = 2100$  кг оптимальной становится 2 передача, что позволяет увеличить производительность до 9%. Установка максимальной по массе ПРЗ  $M_{ПРЗ} = 5200$  кг делает оптимальной 1 передачу, что позволяет поднять производительность до 22%. Для дальнейшего увеличения производительности БА с ПРЗ необходимо соответствующее (пропорциональное массе ПРЗ) увеличение емкости отвала (рис. 11). Для БА на базе ДЭТ–250 (трактор кл.25) с ЭМТ для обеспечения диапазона оптимальных тяговых усилий ( $\varphi_{Конм} = 0,41...0,81$ ) установка ПРЗ ( $M_B = 45200$  кг) требует изменение передаточного числа трансмиссии с 33,24 до 36,64.

Таблица 2

Результаты тягового расчета БА и БРА на базе гусеничных промышленных тракторов Т10 (кл. 10, МТ) на грунте II и III категории и ДЭТ (кл. 25, ЭМТ)

	$N_{кр}$ , Л.С.	$P_{кр}$ , кг	$\varphi_k$	$N_{кр}$ , Л.С.	$P_{кр}$ , кг	$\varphi_k$	$N_{кр}$ , Л.С.	$P_{кр}$ , кг	$\varphi_k$
Т10, кл. 10, МТ, передача	$M_B=17500$ кг			$M_B=19600$ кг (с ПРЗ)			$M_B=22800$ кг (с ПРЗ)		
1	130,08	15550	0,89	134,28	16419	0,84	135,39	16163	0,71
2	135,08	13709	0,78	135,36	13541	0,69	134,73	13963	0,61
3	135,29	12164	0,70	134,72	11996	0,61	133,02	11740	0,51
ДЭТ, кл. 25, ЭМТ	$M_B=39000$ кг, $i_{БР}=11,08$ ; $i_{ТР}=33,24$			$M_B=45200$ кг (с ПРЗ), $i_{БР}=11,08$ ; $i_{ТР}=33,24$			$M_B=45200$ кг (с ПРЗ), $i_{БР}=12,214$ ; $i_{ТР}=36,64$		
Тяговый диапазон	158,6	11186	0,29	152,3	10690	0,24	156,6	12154	0,27
	184,2	24912	0,64	182,87	24414	0,54	184,3	27285	0,60
	155,8	32387	0,83	161,44	31891	0,71	160,98	35970	0,81

Рекомендации по выбору базового шасси и конструкций ПРЗ для машин, работающих на РЗМ. Расположение кабины в средней части шасси гусеничного трактора обеспечивает лучший уровень защиты узлами шасси и позволяет установить кабину с большей массой ПРЗ. Для колесных грузовых машин лучшие показатели ПРЗ оператора обеспечиваются при классической капотной компоновочной схеме (больше масса ПРЗ при одинаковой нагрузке на переднюю ось) и реализации полного привода. Разработан ряд технических решений по улучшению конструкции машин для работы на РЗМ, в том числе защищенных 32 патентами РФ. На основе результатов исследований и анализа конкретных конструкций КГМ с ПРЗ доказана целесообразность предлагаемых решений (существенно повышают эффективность техники, защиту оператора и ряда электронных узлов от ГИ, функциональные характеристики машины) и определены дальнейшие направления развития техники для работы на РЗМ.

Оценка эффективности предлагаемых методик и мероприятий на примере конкретных машин с ПРЗ (в сравнении с базовой машиной) в заданных условиях эксплуатации на реальной РЗМ.

В таблице 3 в качестве примера показаны результаты расчета ряда параметров и характеристик КГМ (часто используемых на РЗМ) по предлагаемым методикам для двух наиболее часто встречающихся при проектировании техники с ПРЗ задач:

- работа с максимальной эффективностью (вторые строки);
- работа техники с максимальной ПРЗ оператора (третьи строки).

Очевидно, что с увеличением энергии и мощности ГИ РЗМ влияние соответствующей ПРЗ на эффективность КГМ будет увеличиваться.

Внедрение результатов исследований. В таблице 4 приведены примеры реализации результатов диссертации в конструкции КГМ с ПРЗ. Результаты исследований используются (в т.ч. при выполнении НИР и ОКР) ЧТЗ, НИИСтали, ГК «Росатом», РФЯЦ НИИТФ и др., и в учебном процессе ЮУрГУ и КГУ.

Таблица 3

Результаты расчета по предлагаемым методикам относительной годовой ( $T=1700$  часов) эффективности машин (защитная кабина с одинаковой толщиной стенок,  $V_{ВН}=1,646 \text{ м}^3$ , ПРЗ – свинец, посадка оператора на продольной оси машины, время входа-выхода машины из зоны работ - 0,4 часа) на РЗМ (ГИ,  $E\gamma=0,8 \text{ МэВ}$ ,  $P_{ОБ}=0,15 \text{ мЗв/ч}$ )

Кабина	Толщина ПРЗ, см	Кратность ослабления ГИ узлами		$n_0$ , чел	Затраты, у.е.		Эффективность	
		кабины	машины		$Z_{\Sigma 0}$	$Z_3$	$\text{Э}_{3-Б}$	$\text{Э}_{i-Б}$
<b>Бульдозер на базе трактора Т10 (грунт II и III категории)</b>								
Серийная (базовая)	-	-	2,75	5	100278	-	1	1
с защитой от ГИ, $M_{\text{ПРЗ}}=2094 \text{ кг}$	2,13	4,64	12,75	1	20060	9507	<b>4,75</b> <sup>*2</sup>	<b>5,18</b> <sup>*3</sup> <b>5,32</b> <sup>*4</sup>
с макс. защитой от ГИ, $M^*_{\text{ПРЗ}}=5000 \text{ кг}$	4,86	57,43	157,93	1	20005	22700	3,29	<b>4,01</b> <sup>*3</sup> <b>4,28</b> <sup>*4</sup>
<b>Грузовой автомобиль на базе УРАЛ-4320</b>								
Серийная (базовая)	-	-	1,8	8	160400	-	1	1
с защитой от ГИ, $M_{\text{ПРЗ}}=2545 \text{ кг}$	2,57	6,71	12,75	1	20060	11550	<b>10,15</b> <sup>*2</sup>	<b>7,10</b> <sup>*5</sup>
с макс. защитой от ГИ, $M^*_{\text{ПРЗ}}=2790 \text{ кг}$	2,8	7,9	15,01	1	20050	12670	9,81	<b>6,87</b> <sup>*5</sup>

\*1 – максимально возможная масса ПРМ; \*2 – максимальная относительная эффективность ПРЗ по критерию «эффект-затраты»; \*3 – эффективность бульдозера с оптимальным передаточным числом трансмиссии; \*4 – эффективность бульдозера с оптимальным передаточным числом трансмиссии и дополнительно увеличенной емкостью отвала; \*5 – эффективность грузового автомобиля с учетом уменьшения производительности на 30%, связанного с установкой ПРЗ (уменьшение скорости передвижения и массы груза).

Таблица 4 (начало)

Ряд основных внедрений результатов диссертации в конструкции КГМ с ПРЗ для РЗМ

Машина	Внедрено	Основной разработчик	Изготовитель	Состояние и сроки внедрения
1	2	3	4	5
БА и БРА ДЗ-171.1КЗ (кл.10)	Б и ВП* на максимальный уровень ПРЗ, расчет, конструкция и технология изготовления ПРЗ и машины в целом, методика испытаний ПРЗ	ГСКБ ЧТЗ, расчет ПРЗ – НИИСтали, ГСКБ-2 ЧТЗ	ЧТЗ	ОПП, ЧТД на серийное пр-во. Приняты на снабж. МО СССР (приказ ГК СВ №72 от 15.06.90).
БА и БРА ДЗ-132-1КЗ(кл.25)		ГСКБ-2 ЧТЗ, расчет ПРЗ – НИИСтали, ГСКБ-2 ЧТЗ	ЧТЗ	
Трактора Т-130 / Т-170 с ПРЗ и агрегаты на их базе	БиВП*, конструкция ПРЗ, предложения по получению максимального уровня ПРЗ конкретных машин	ГСКБ ЧТЗ (базовое шасси, ПРЗ), ЧЗК – агрегаты	ЧТЗ, ЧЗК	ОПП и отдельные образцы, 1986...1992гг
Радиоуправл. трактора (с ПРЗ блоков управл.) Т-130МС, Т10.32-8/9, ДЭТ-250М2С	Расчет, параметры и конструкция ПРЗ блоков управления и машины	ГСКБ ЧТЗ (основн. разработчик), ГСКБ-2 ЧТЗ (по ПРЗ), НИИИТ, НПО «КИТ»...	ЧТЗ, НИИИТ НПО «КИТ» и др.	ОПП, Т10.32-8 принят на снабж. инж. войсками МО СССР (реш. № 113-12-90, В/Ч 52684).
Т-170, Т10...Т15 БА/БРА на их базе (с ПРЗ и под установку ПРЗ в экспл.)	Расчет эффективности, БиВП*, тяговая характеристика, параметры рабоч. оборуд., конструкция и технология изготовл, методика испыт.	ГСКБ ЧТЗ, ГСКБ-2 ЧТЗ, КБ по спецтехнике ЧТЗ, ГК «Росатом»	ЧТЗ, ПРЗ в экспл. - ГК «Росатом»	ОПП и отдельн. образцы, ЧТД базовых машин - серийное пр-во, 1986...2019гг

**Таблица 4 (окончание)**

1	2	3	4	5
Макеты машин с БПРЗ** (по заказу МО РФ)	БиВП*, констр. изготовл. ПРЗ и элементов машины, методика испытаний ПРЗ	ЧТЗ, НИИСтали, испыт. - те же и РФЯЦ НИИТФ	ЧТЗ, НИИ Стали	Опытные образцы (полноразмерные)
Изд. 781 и 782 с БПРЗ**	Расчет параметров ПРЗ, компоновка и констр. ПРЗ	ЧТЗ, НИИСтали	ЧТЗ	Опытные образцы
Автомобили Урал-4320/53234 с БПРЗ**	Расчет эффективности, БиВП*, тяговая характ-ка, конструкция и технология изготовл. ПРЗ и машины.	УралАЗ, ЧТЗ	УралАЗ, ЧТЗ,Стан-комаш-БПРЗ**	Опытные образцы, на их основе – серийн. ЧТД и пр-во, 1999...2020гг
ПМГ12.01 (с ПРЗ дистанц. управл.)	БиВП*. Расчет, параметры и констр. ПРЗ управления	ЧТЗ, ООО «Снег» - система управл. и ПРЗ (совм. с ЧТЗ)		Опытный образец, 2014...2016гг
БА и БРА Б10М2С (кл.10), Б12С.5020ЕН (кл. 15) с БПРЗ**	Расчет эффективности, БиВП*, тяговая харкт-ка, конструкция и технология изготовления ПРЗ и машины.	КБ по спецтех-нике ЧТЗ	ЧТЗ	ОПП, в том числе Гособорнзаказ-2017, 2015...2020гг сертиф. на серийн. выпуск до 1.11.2022
МКМБ ПК55С с БПРЗ** (по техническим требованиям УНИВ ВС РФ)	Расчет эффективности, БиВП*, тяговая харкт-ка, параметры рабоч. оборуд., конструкция и технология изготовл. ПРЗ и машины.	КБ по спецтех-нике ЧТЗ	ЧТЗ	Опытный образец, 2018г

\* БиВП – базовые и внешние параметры, \*\*БПРЗ – броневая и противорадиационная защита

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Разработана новая концепция и методология комплексного системного подхода к КГМ для работы на РЗМ, основанные на рассмотрении защиты как подсистемы в системе «РЗМ – машина – оператор», применении новых математических моделей расчета и проектирования, изменении параметров базовой машины в соответствии с установленной ПРЗ, введении оценки использования машины на РЗМ по критерию «эффективность – затраты». По существу, разработаны основы выбора параметров и конструкций КГМ с ПРЗ (при минимуме исходных данных), значительно повышающих эффективность машины на РЗМ.

Эффективность машины на РЗМ определяется переменными критериями, элементы которых являются функциями параметров машины и поля ГИ, а задача получения максимальной эффективности в общем виде определяется производительностью, временем работы на РЗМ (уровнем ПРЗ) и приведенными затратами на единицу выполненной работы. Поскольку ПРЗ в основном определяет эффективность КГМ на РЗМ и влияет на другие технические параметры машины, то проектирование таких машин необходимо осуществлять после определения необходимого уровня защиты оператора, а также соответствующего изменения зависящих от этой защиты значений базовых параметров и характеристик (производительности, массово-габаритных, тягово-скоростных и др.).

2. Разработаны новые математические модели и на их базе экспресс-методики оценки уровня защиты оператора от ГИ узлами шасси, рабочего оборудования и

конструкцией кабины, позволяющие рассчитать ПРЗ без подробной компоновочной схемы машины (расхождение с расчетом по ГОСТ В 26457 по компоновочной схеме не превышает 10%).

Для оценки влияния узлов шасси на ПРЗ оператора предложены две базовые модели: «автомобиль» и «трактор». Модели учитывают особенности шасси машины (тип ходовой системы, грузоподъемность, габаритно-массовые параметры, место размещения операторов) и характеристику РЗМ (мощность, энергия и место расположения источника излучения). Получена и подтверждена экспериментально оценка влияния габаритных параметров шасси и места расположения оператора на уровень его защиты. Изменение места положения кабины на шасси колесных машин изменяет ПРЗ оператора от ГИ грунта до 30%, у гусеничных машин до 50%.

Реальное увеличение длины, ширины рабочего оборудования и его удаление от расчетных точек приводит приближенно к линейному росту защиты оператора от ГИ грунта. Предельный уровень ПРЗ оператора для единицы рабочего оборудования КГМ составляет до 1,15 крат.

Математическая модель защитного экрана кабины описывается в виде куба, толщина стенок которого определяется действительным решением уравнения третьей степени и зависит от материала стенок, массы и объема кабины. Уменьшение толщины крыши (толщины ПРЗ) равнозащищенной со всех направлений кабины на 30% позволяет увеличить толщину других защитных стенок на 6%, при этом их кратность ослабления дозы ГИ ( $E\gamma = 0,8 \text{ МэВ}$ ) для рассматриваемых условий повышается в 1,5...2 раза.

3. Смещение ЦМ машины (в связи с установкой ПРЗ) приводит к росту сопротивления движению, уменьшению удельных тяговых усилий и снижению тягового КПД, которые можно исправить путем пропорционального изменения передаточного числа трансмиссии. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что для рассматриваемых условий при установке ПРЗ на трактор Т10 оптимальный тяговый КПД  $\varphi_{\text{Конт}} = 0,7$  обеспечивается за счет резерва имеющихся рабочих передач, а на ДЭТ-250М2 для обеспечения  $\varphi_{\text{Конт}} = 0,41...0,81$  требуется замена передаточного числа трансмиссии с 33,24 до 36,64.

Теоретически получены и верифицированы новые значения показателей степени в аналитической зависимости буксования с тяговым КПД для КГМ при значительном смещении ЦМ.

Введен коэффициент эффективности трансмиссии колесной машины, позволяющий определять рациональную колесную формулу проектируемого автомобиля в зависимости от ПРЗ и дорожных условий.

На основе статистической обработки получены новые корреляционные зависимости параметров различного БО (масса, объем, ширина и высота отвалов) разных по классу БА от массы трактора (в том числе при установке ПРЗ).

Использование расчетных рациональных передаточных чисел трансмиссии и соответствующих параметров отвала обеспечивает рост производительности БРА с ПРЗ (при разработке грунтов II категории) на базе тракторов:

- классов 10, 15 с МТ и ГМТ при добавке массы ПРЗ  $\Delta M_{\text{ПРЗ}} = 5500\text{кг}$  – на 30%;
- класса 25 с ЭМТ при добавке массы ПРЗ  $\Delta M_{\text{ПРЗ}} = 6200\text{кг}$  – на 34%.

Для оценки влияния ПРЗ на прочностные характеристики гусеничного шасси разработана динамическая математическая модель БА, имитирующая эксплуатацию на РЗМ. Расчет по модели показал, что увеличение массы БРА за счет ПРЗ на 25% увеличивает напряжения в ряде зон в 1,5 раза и более, напряжения в балансирной балке в зоне контакта с упором в 3...4 раза выше уровня общей напряженности.

4. Экспериментально подтверждены расчетные значения: ПРЗ узлами КГМ (БРА и грузовых машин) с погрешностью до 13% (погрешность измерения до 10%); зависимости ослабленных зон машины от места расположения кабины на шасси.

Предложено и обосновано применение метода гаммаграфии и плоского гамма-облучателя при проверке уровня и качества изготовления ПРЗ кабины. Совместно с РФЯЦ ВНИИТФ подобраны параметры метода для дефектоскопии свинцовой защиты толщиной до 50мм с разрешением дефектов 5 мм.

Экспериментально подтверждено увеличение производительности за счет реализации в тягу массы ПРЗ и соответствующего изменения передаточного числа трансмиссии до рационального (без изменения параметров рабочего оборудования):

- для БРА с МТ и ГМТ (на базе тракторов Т10, Т15) с ПРЗ увеличение массы и передаточного числа трансмиссии на 14% повысило производительность на грунтах II категории на 14,5%, за счет увеличения призмы волочения на 24,6%, при снижении рабочей скорости на 11,6%;

- для БРА с ЭМТ с ПРЗ (на базе трактора ДЭТ-250М2) увеличение массы на 5265кг и передаточного числа механической части трансмиссии на 10,2% обеспечило прирост производительности на грунтах II категории на 19,1%.

Расхождение экспериментальной и расчетной оценок производительности БРА с ПРЗ не превышает 13%.

Полученные расчетные зависимости параметров отвалов БА имеют высокие значения коэффициента корреляции Пирсона, что подтверждает достаточно точное описание взаимосвязей этих параметров по предлагаемым уравнениям и графикам.

Экспериментальная и теоретическая оценка прочностных характеристик, рассмотренных шасси показала сходимость результатов с погрешностью до 9%.

5. Приведены примеры реализации предлагаемых методик для оценки КГМ и выбора их параметров при минимуме исходных данных. Получены расчетные значения параметров КГМ с ПРЗ (конкретные тракторы и автомобили), в том числе в сравнении с базовой машиной, на различных заданных РЗМ: максимально достижимого уровня ПРЗ; максимальной эффективности машины и др.

Расчетные значения увеличения эффективности рассмотренных машин с рациональными параметрами на рассмотренной РЗМ по критерию «эффект – затраты», составляют (в сравнении с базовой КГМ):

- для БРА с ПРЗ на базе трактора Т10 – 4,75 (максимальная эффективность применения ПРЗ) и 5,32 (с изменением параметров базового шасси и отвала);
- для грузового автомобиля на базе Урал-4320 с ПРЗ – 7,10 (с учетом максимальной эффективности применения ПРЗ и изменением параметров шасси).

6. Проведен анализ и даны рекомендации по выбору базовых шасси КГМ с ПРЗ. Разработаны решения, повышающие эффективность КГМ, качество и безопасность работ при изготовлении ПРЗ и машины. Разработки защищены 33 патентами РФ на изобретения, промышленные образцы и полезные модели.

Полученные практические результаты исследований дают возможность расчетного определения значений основных параметров техники, повышающих эффективность ее работы на РЗМ. Разработанные рекомендации сокращают время и материальные затраты на проектирование, ускоряют процесс постановки на производство, освоение новых и совершенствование существующих КГМ с ПРЗ.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. *Гусев, С.А.* Совершенствование гусеничной и колесной техники для работы на радиоактивно зараженной местности (теория, практика, технико-экономическая оценка): монография / С.А. Гусев. – Челябинск, ЮУрГУ: Цицеро, 2011. – 177 с.

#### **В изданиях, рекомендованных ВАК России**

2. *Гусев, С.А.* Проблема создания эффективной техники с противорадиационной защитой оператора и возможные научно-практические пути ее решения / С.А. Гусев, С.В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение» – 2019. – Т.19, № 3. – С. 33–42.

3. *Гусев, С.А.* Расчет уровня противорадиационной защиты оператора колесных и гусеничных машин / С.А. Гусев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 1. – С. 20–23.

4. *Гусев, С.А.* Влияние установки противорадиационной защиты оператора на основные технические параметры гусеничных тракторов и специализированных машин на их базе / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 12. – С. 8–11.

5. *Гусев, С.А.* Оценка эффективности применения техники с противорадиационной защитой оператора на начальном этапе проектирования / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 15–18.

6. *Гусев, С.А.* Особенности расчета технико-экономической оценки грузового АТС, работающего на радиоактивно зараженной местности / С.А. Гусев, А.В. Пигалов // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 8. – С. 28–31.

7. *Гусев, С.А.* Оптимальные передаточные числа трансмиссии бульдозеров с противорадиационной защитой оператора / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 5. – С. 22–23.

8. *Гусев, С.А.* Экспресс – оценка уровня защиты оператора узлами рабочего оборудования специальных машин от гамма – излучения грунта / С.А. Гусев, А.В. Пигалов // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 3. – С. 21–25.

9. Гусев, С.А. Влияние места установки специальной защитной кабины гусеничного трактора на его использование в радиоактивно зараженной зоне / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 12. – С. 24–27.
10. Гусев, С.А. Методика расчета максимально возможного уровня противорадиационной защиты оператора / С.А. Гусев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 4. – С. 24–26.
11. Гусев, С.А. Влияние изменения параметров рабочего оборудования специальной техники на уровень защиты машиниста от гамма – излучения грунта / С.А. Гусев, В.Г. Апанасик, А.В. Пигалов // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 4. – С. 26–28.
12. Гусев, С.А. Оценка уровня противорадиационной защиты оператора облучаемой машины методом круговых диаграмм / С.А. Гусев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2010. – № 7. – С. 14–15.
13. Березин, И.Я. Комплексные расчетно – экспериментальные исследования по обеспечению надежности промышленных тракторов / И.Я. Березин, В.Н. Бондарь, С.А. Гусев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение» – 2009. – Вып. 13. – № 11 (144). – С. 4–10.
14. Бондарь, В.Н. Особенности конструкции и технологии изготовления кабины с защитой оператора от ионизирующих излучений / В.Н. Бондарь, С.А. Гусев, Г.П. Ожегов, В.И. Раевский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 12. – С. 45–48.
15. Гусев, С.А. Влияние компоновочной схемы грузового автомобиля на возможный уровень противорадиационной защиты водителя – оператора / С.А. Гусев, А.В. Пигалов // Вестник академии военных наук – М.: МО РФ. – 2011. – № 2. – С. 84–86.
16. Гусев, С.А. Математическое выражение зависимости уровня противорадиационной защиты оператора от габаритно – массовых параметров шасси гусеничного трактора / С.А. Гусев // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 9. – С. 6–11.
17. Гусев, С.А. О дистанционном управлении тракторов и агрегатов на их базе (опыт использования, принципы управления, направления развития) / С.А. Гусев // Вестник академии военных наук. – М.: МО РФ. – 2011. – № 2. – С. 78–84.
18. Гусев, С.А. Боевая машина поддержки танков / С.А. Гусев // Вестник бронетанковой техники. – 1991. – № 7. – С. 47–51.
19. Гусев, С.А. Возможная компоновочная схема танка / С.А. Гусев // Вестник бронетанковой техники. – 1991. – №12. – С. 8–13.
20. Гусев, С.А. Экспериментальные исследования эффективности противорадиационной защиты оператора, специальной техники на различных облучателях / С.А. Гусев // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
21. Гусев, С.А. Доработка базового шасси колесных и гусеничных машин для работы на радиоактивно зараженной местности / С.А. Гусев, А.В. Пигалов // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 11. – С. 30–33.
22. Гусев, С.А. Расчетно – экспериментальная оценка производительности тракторных агрегатов с учетом перемещения между объектами своим ходом / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2012. – № 1. – С. 23–25.
23. Гусев, С.А. Расчет производительности тракторного агрегата / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 1. – С. 6–11.
24. Гусев, С.А. Выбор бульдозерного оборудования и его основных характеристик для разных классов тракторов / С.А. Гусев, Р.О. Хайсаров // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 5. – С. 2–7.
25. Докшин, И.В. Какой он современный автомобиль – самосвал / И.В. Докшин, А.В. Келлер, С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 1. – С. 21–29.

### В других источниках

26. Гусев, С.А. Зависимость уровня противорадиационной защиты кабины от количества и размещения экипажа. / С.А. Гусев // Тюмень: Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта, 2005. Вып. 5. С. 53-55.

27. Гусев С.А. Предварительный расчет основных параметров машины для работы на радиоактивно зараженной местности и особенности ее конструкции / С.А. Гусев // Материалы Всерос. конф. «Танкопром, век XX. Опыт взаимодействия Танкопрома с другими отраслями промышленности, академической и вузовской наукой». – Нижний Тагил – 2013. – С. 227–232.

28. Гусев С.А. Закономерности развития и некоторые основные варианты конструкции броневой и противорадиационной защиты гусеничных и колесных машин на базе народнохозяйственной техники / С.А. Гусев // Материалы Всерос. науч. – практ. конф. «Танкопром», сб. науч. ст. – М.: изд. ОАО «НПК «УВЗ». – 2014.– С. 31–38.

### Патенты на изобретения, промышленные образцы и полезные модели.

29. Патент РФ на изобретение № 1782843. Способ изготовления панелей с защитой от радиоактивных излучений / С.А. Гусев, В.П. Котнов, Г.П. Ожегов, В.И. Раевский.

30. Патент РФ на изобретение № 2009555. Узел соединения панелей с защитой от радиоактивных излучений / С.А. Гусев, В.П. Котнов, Г.П. Ожегов, В.И. Раевский.

31. Патент РФ на изобретение № 2060189. Узел соединения панелей с защитой от радиоактивных излучений / С.А. Гусев, В.П. Котнов, Г.П. Ожегов, В.И. Раевский.

32. Патент РФ на изобретение № 2060190. Узел соединения панелей с защитой от радиоактивных излучений / С.А. Гусев, Г.П. Ожегов, В.И. Раевский.

33. Патент РФ на промышленный образец № 68095. Гусеничный трактор (два варианта) / В. М. Платонов, Г. П. Мицын, С. А. Гусев и др. – Оpubл. 16.10.08.

34. Патент РФ № 92844. Гусеничный трактор с электрической трансмиссией / С. А. Гусев, И. М. Клайн, В. И. Раевский. – Оpubл. 10.04.10, бюл. № 10.

35. Патент РФ № 108399. Ходовая часть трактора с торсионной подвеской / С. А. Гусев, В. И. Раевский, О. Х. Основина. – Оpubл. 20.09.11, бюл. № 26.

36. Патент РФ на изобретение № 2194637. Способ съема и установки защитного поддона колесных и гусеничных машин и устройство для его осуществления / В. И. Раевский, С. А. Гусев, Ю. С. Устинов. – Оpubл. 20.12.02, бюл. № 35.

37. Патент РФ №135610. Рама тележки гусеничного промышленного трактора / С. А. Гусев, И.М. Клайн, А.В. Бурков. – Оpubл. 20.03.15, бюл. №8.

38. Патент РФ № 83466. Тележка ходовой части гусеничной машины, приспособленная под размещение инструмента / Г. П. Мицын, С. А. Гусев, В. И. Раевский. – Оpubл. 10.06.09, бюл. № 16.

39. Патент РФ № 182104. Бронированный трактор с рабочим оборудованием / С. А. Гусев, Кирин П.Ф., Раевский В.И. – Оpubл. 03.08.18, бюл. № 8.

40. Патент РФ № 112849 на промышленный образец. Промышленный трактор с защитой от стрелкового оружия / С. А. Гусев и др. – Оpubл. 11.01.19, бюл. № 1.

41. Патент РФ № 194336. Силовое отделение бронированного трактора с системой охлаждения / С. А. Гусев и др. – Оpubл. 06.12.19, бюл. № 34.

42. Патент РФ № 199127. Защитная решетка радиатора бронированной машины / С. А. Гусев – Оpubл. 17.08.20, бюл. № 23.