

На правах рукописи



КРУСАНОВ Виктор Сергеевич

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ДЕЗАКТИВАЦИИ  
РАДИОАКТИВНЫХ ПРОСЫПЕЙ И ПРОЛИВОВ

Специальность 05.02.05 – роботы, мехатроника и  
робототехнические системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

-доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Маленков Михаил Иванович

Официальные оппоненты:

-доктор технических наук, профессор

Поршнева Геннадий Павлович

-кандидат технических наук, доцент

Машков Константин Юрьевич

Ведущая организация:

ФГУП НИКИЭТ им. Н.А.Доллежала, Москва.

Защита диссертации состоится « 5 » апреля 2005 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, 1 учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «    » февраля 2005г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212 .229. 12  
кандидат технических наук, доцент

Евграфов А.Н

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** По мере перехода общества на более высокие ступени развития ценность человеческой жизни и здоровья неуклонно возрастает и, в связи с этим, возрастает потребность в технических средствах, способных защитить человека в экстремальных условиях. Атомная энергетика относится к тем отраслям, которые, при минимальном ущербе окружающей среде, способны производить наибольшее количество энергии на единицу затраченных природных ресурсов и человеческого труда. При этом все большее внимание уделяется безопасности ядерных технологий, так как чрезвычайные ситуации в отрасли способны нанести ущерб здоровью человека.

К таким техногенным чрезвычайным ситуациям относятся разного рода инциденты на ядерных энергетических установках, случаи нештатного обращения с ядерными отходами и нештатные ситуации при перевозке и переработке высокотоксичных химических веществ. Произошедшие в последнее время террористические акты показали, что в их подготовке задействованы огромные финансовые ресурсы и специалисты, владеющие всеми современными достижениями науки и техники. Поэтому, к сожалению, нельзя исключить проведения акции с разбрасыванием радиоактивных материалов в густонаселенных городах любой страны мира.

Все вышесказанное делает разработку робототехнического оборудования для ликвидации последствий радиационных инцидентов весьма актуальной проблемой, над решением которой работает целый ряд отечественных и зарубежных организаций. Можно отметить, в частности, разработки робототехнических комплексов, приборов, навесного оборудования и дезактивационных технологий, выполненные в НИКИМТ, ИТУЦР НИКИМТ, ВНИИТрансмаш, НИКИЭТ им.Н.А.Доллежала ИФТП, РНЦ Курчатовский институт, ЦНИИ РТК, СКТЬ ПР МГТУ им.Н.Э.Баумана, НТЦ «Ровер» им. А.Л.Кемурджиана, ЮжУГТУ, ППП «Рарос», расчетно-теоретические и экспериментальные исследования мобильных роботов различного назначения, выполненные в ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, Институте Механики МГУ им. М.В.Ломоносова, Институте проблем механики РАН, СПбГПУ, других предприятиях и организациях. Из зарубежных организаций, работающих в данном направлении, наиболее известны ядерный центр в Карлсруэ (ФРГ), «Remotec» и «Red Zone» (США), «GROUP INTRA» и «Cibernetix» (Франция).

Ключевой задачей современного этапа развития рассматриваемого направления робототехники является переход от создания отдельных устройств к разработке комплексных роботизированных технологий локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений. Такие технологии включают в себя помимо мобильного робота: метод радиационной разведки, метод дезактивации или локализации, приборы и навесное оборудование для реализации этих методов и алгоритм эффективного использования всего комплекса в целом. Поэтому **целью диссертационной работы** является разработка роботизированных технологий локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений и методов проектирования навесного и прицепного оборудования робототехнических комплексов для ликвидации последствий радиационных инцидентов.

Для достижения этой цели были сформулированы следующие основные задачи:

- анализ известных методов локализации и дезактивации с точки зрения возможности их адаптации к проведению дистанционных работ робототехническими комплексами;
- обоснование критериев эффективности и структуры необходимого навесного оборудования робототехнических комплексов для реализации роботизированных технологий локализации и дезактивации с использованием полимерных композиций;
- разработка методик экспериментов и исследование физико-механических характеристик взаимодействия полимерных композиций с дезактивируемыми поверхностями и навесным оборудованием робототехнических комплексов;
- разработка математических моделей, синтез механизмов и предложение проектных решений по конструкции навесного и прицепного оборудования, оптимально сопрягающегося с робототехническим комплексом;

- разработка алгоритмов выполнения технологических процессов дистанционной локализации и дезактивации радиоактивных просыпей и проливов;
- проведение комплексных испытаний нового оборудования в составе робототехнических комплексов.

#### **Методы исследования**

В основу теоретических и экспериментальных исследований положены основные законы классической физики, методы теоретической механики, теории машин и механизмов, физического моделирования, компьютерной обработки видеoinформации, математической статистики и планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современной дозиметрической и метрологической аппаратуры.

Вычисления в процессе исследований, а также численная и графическая обработка результатов, проводились на ЭВМ типа IBM PC AT с использованием математического аппарата прикладных программ.

#### **Научную новизну работы составляют:**

- анализ существующих методов локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений с точки зрения их применимости для дистанционных работ робототехническими комплексами;
- новый метод очистки поверхностей от загрязнений, отличающийся тем, что он сочетает в себе эффективность метода снимаемых полимерных покрытий с возможностями мобильных робототехнических комплексов;
- новый способ сбора радиоактивных проливов, отличающийся тем, что он позволяет преобразовывать их в твердые радиоактивные отходы с использованием универсальных робототехнических комплексов;
- новое принципиальное решение двухзвенного робототехнического комплекса, отличающееся наличием активного прицепа с управляемыми приводами мотор-колес;
- математическая модель системы тягач – активный прицеп, позволившая провести тягово-динамический расчет и определить расчетным путем характеристики маневренности и управляемости такой системы;
- математические модели дезактивирующего захвата, клещевого, патографного навесных механизмов и решения по оптимизации конструкций, полученные на основе этих моделей.

#### **На защиту выносятся:**

- роботизированные методы очистки поверхностей от радиоактивных просыпей и сбора радиоактивных проливов;
- обоснование структуры и характеристик навесного оборудования, необходимого для реализации роботизированных технологий локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений с использованием метода снимаемых полимерных покрытий;
- методики и результаты исследований взаимодействия навесного оборудования робототехнических комплексов с полимерными композициями и очищаемыми поверхностями;
- схемное решение двухзвенного робототехнического комплекса с активным прицепом;
- математическая модель двухзвенного робототехнического комплекса;
- математические модели дезактивирующего захвата и отрывных механизмов.

#### **Практическая ценность**

На основе полученных в результате исследования данных было создано навесное оборудование робототехнических комплексов (РТК) для дистанционных работ по локализации радиоактивных загрязнений, которое внедрено в эксплуатацию на аварийно-технических центрах (АТЦ) Федерального агентства по атомной энергии.

Был создан и внедрен в эксплуатацию активный прицеп к подвижным аппаратам КРТ-100 и КРТ-200 для доставки в зону работ технологического оборудования и вывоза твердых радиоактивных отходов.

Был создан и внедрен в эксплуатацию комплект навесного оборудования РТК, позволяющий проводить дистанционную дезактивацию радиоактивных просыпей без присутствия человека в зоне проведения работ.

Был создан и внедрен в эксплуатацию впитывающий захват для РТК, позволяющий проводить дистанционный сбор радиоактивных проливов без присутствия человека в зоне проведения работ.

Вышеперечисленные разработки позволяют существенно сократить, а в ряде случаев и полностью исключить, дозовые нагрузки на персонал АТЦ.

### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены и обсуждены на научно-техническом семинаре ВНИИТрансмаш (СПб 2003г.); на межотраслевом совещании «Технологии и установки для обращения с ТРО» НИКИЭТ (Москва 2004г.); на 15 научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» ЦНИИРТК (СПб 2004г.); на научно-техническом совете ИТУЦР головной организации ФААЭ РФ по робототехнике (Москва 2004г.); на заседании кафедры «Автоматы» СПб ГПУ (СПб 2004г.)

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 14 работ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, содержит 151 страницу машинописного текста, 39 рисунков, 2 таблицы, 22 фотографии, библиографический список использованных источников из 103 наименований и приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации на основе анализа современных подходов к ликвидации последствий радиационных инцидентов, сформулированы цели и задачи работы, указаны методы исследования и практическая значимость работы.

**В первой главе** основное внимание уделяется анализу существующих методов и оборудования, применяемых при ликвидации последствий радиационных инцидентов и определению наиболее эффективных путей создания РТК для дистанционных работ по локализации и дезактивации радиоактивных просыпей и проливов.

Анализ собранной информации показал, что ни один из существующих методов локализации не может быть применен без присутствия человека в зоне работ. Сделан вывод, что наиболее перспективным для адаптации к использованию с РТК, является метод локализации с использованием полимерных пленок, разработанный НИКИМТ. Обосновано проектное решение о создании управляющего механизма, который позволяет использовать ручной пистолет-распылитель с любыми типами дистанционно-управляемых манипуляторов РТК.

Автором предложено проводить сбор радиоактивных просыпей и дезактивацию поверхностей с применением снимаемых полимерных пленок дистанционно-управляемыми средствами РТК. Приведены предложенные автором алгоритмы выполнения дистанционных работ по локализации и дезактивации. Необходимость создания комплекта навесного оборудования РТК для дезактивации радиоактивных просыпей и проливов объясняется отсутствием технических средств, позволяющих проводить такие работы в затесненных помещениях при радиационной обстановке, исключающей присутствие человека в зоне работ. Ставится задача создания одноразовых приспособлений (дезактивирующих захватов), позволяющих исполнительному органу РТК отрывать от поверхности полимерную пленку с адсорбированными частицами радиоактивных загрязнений и отправлять их на захоронение.

Для дистанционного сбора радиоактивных проливов автором было предложено создать одноразовые приспособления (впитывающие захваты), всасывающих жидкость с последующим превращением ее в гель. Использование таких приспособлений позволяет исполнительному органу РТК собирать радиоактивные жидкости с поверхностей и из различных углублений с превращением их в твердые радиоактивные отходы (ТРО) непосредственно на месте проведения работ.

Проанализированы результаты работ по ликвидации последствий инцидентов на различных радиационно-опасных объектах. Сделан вывод о неоправданно высоких дозовых нагрузках на персонал и высокой вероятности вторичного распространения загрязнений при проведении работ без использования робототехники. Сформулированы критерии эффективности РТК, применяемых при дистанционной ликвидации радиационных инцидентов, важнейшими из которых является наличие в составе РТК средств радиационной разведки (гамма-локаторов), позволяющих точно определить изотопный состав и расположение радиоактивных загрязнений, а также показатели дезактивации поверхностей и отсутствие жидких радиоактивных отходов по окончании работ.

**Во второй главе** рассматриваются вопросы экспериментального исследования механических характеристик полимерных композиций и конструкционных материалов при взаимодействии с загрязненными поверхностями и рабочими органами РТК. Цель исследования – выработка рекомендаций по подбору конструкционных материалов и полимерных композиций для дезактивирующих и впитывающих захватов и определение нагрузок на исполнительные органы РТК при отрыве дезактивирующих захватов от поверхности.

Дезактивирующий захват представляет собой металлическую рамку с приклеенным к нижней поверхности по всему периметру уплотнителем. Внутри рамки захвата натянута армирующая сетка. Сверху к рамке захвата прикреплен установочный элемент, позволяющий укладывать его на радиоактивную просыпь, не прикасаясь к загрязненной поверхности исполнительным органом РТК.

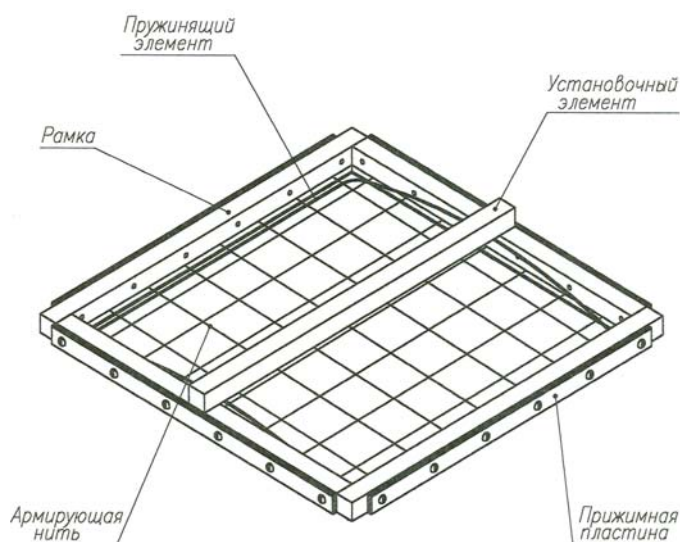


Рис. 1. Конструктивная схема дезактивирующего захвата.

При проведении дистанционных работ по сбору радиоактивных просыпей с плоских поверхностей дезактивирующий захват укладывается манипулятором РТК поверх обнаруженной просыпи и заполняется жидкой полимерной композицией при помощи дистанционно-управляемого дозатора. Уплотнитель захвата должен удерживать полимерную композицию от растекания по поверхности за пределы рамки захвата. В ходе экспериментов был выбран уплотнительный элемент, состав полимерной композиции, обеспечивающие выполнение этой задачи и определены удельные нагрузки на уплотнительный элемент, которые должны создаваться весом рамки захвата. Оптимальные результаты были достигнуты при использовании трубчатого уплотнительного элемента из микропористой резины диаметром 7 мм при удельной нагрузке не менее 16,3 Н/м и вязкости полимерной композиции от 120 до 140 секунд.

По окончании полимеризации жидкой полимерной композиции образовавшаяся пленка должна вобрать в себя фрагменты радиоактивной просыпи, склеиться с загрязненной поверхностью для обеспечения сбора пылевидной фракции загрязнения и, при этом, прочность ее сцепления с армирующей сеткой дезактивирующего захвата должна превышать адгезию к загрязненной поверхности. При проведении экспериментов из ряда испытываемых образцов была выбрана стеклотканная армирующая сетка, обладающая наилучшей сцепляемостью с полимерной пленкой и, при этом, выдерживающая разрывные нагрузки, возникающие при отрыве дезактивирующего захвата от поверхности.

Была проведена серия экспериментов с целью определения отрывных усилий, воздействующих на исполнительный орган РТК и выработки проектных рекомендаций по конструкции дезактивирующих захватов. Результаты экспериментов показали, что предварительная экспертная оценка занижала ожидаемые значения отрывных усилий дезактивирующих захватов на два порядка. Результаты экспериментов отражены на графике рис. 2.

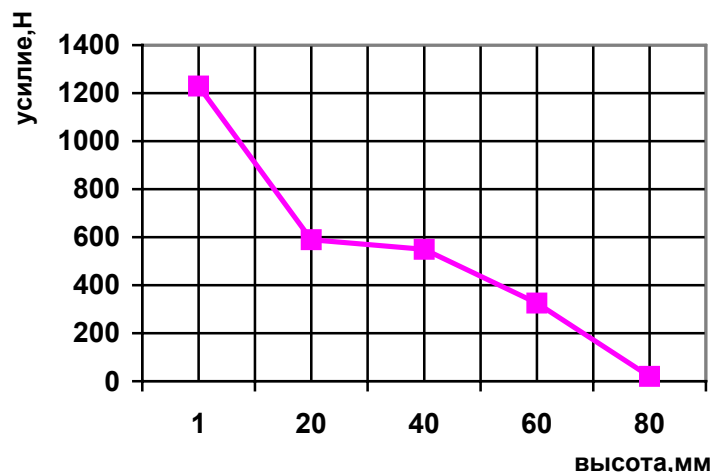


Рис. 2. Зависимость отрывных усилий от высоты подъема захвата.

Был сделан вывод о необходимости создания навесных приспособлений для манипулятора РТК, которые позволили бы производить отрыв дезактивирующих захватов манипулятором с грузоподъемностью вдвое меньшей, чем их отрывное усилие. Такое решение, в свою очередь, позволяет использовать для проведения дистанционных работ по дезактивации просыпей малогабаритный подвижный аппарат РТК с низким энергопотреблением.

Исследование процесса отрыва полимерной пленки армированной сеткой от загрязненной поверхности позволило выявить эмпирическую зависимость усилия отрыва от длины линии отрыва. Указанная зависимость выражается формулой:

$$T = K_c \times L, \quad (1)$$

где  $T$  – отрывное усилие захвата, Н,  $L$  – длина линии отрыва пленки, мм,  $K_c$  – коэффициент пропорциональности, Н/мм. Получено среднее значение  $K_c = 0,92$  Н/мм.

Статистическая обработка результатов экспериментов позволила подтвердить предположение, о том, что отрывное усилие дезактивирующих захватов, являясь случайной величиной, зависящей от множества факторов, подчиняется, с хорошей степенью приближения, закону нормального распределения. В соответствии с «правилом трех сигм» можно утверждать, что с вероятностью 0,997 отрывное усилие дезактивирующего захвата при отрыве запрокидыванием будет находиться внутри диапазона 520÷750 Н. Наиболее вероятным для этого усилия следует признать значение 640 Н, являющееся центром рассеивания.

Были проведены исследования характеристик конструкционных материалов и абсорбента для впитывающих захватов. На основании их результатов для использования во впитывающих были выбраны нетканые материалы на основе вискозы «Фиб 20», «ФибЛаминат» и абсорбент «Марс». Был сделан вывод о необходимости расположения абсорбента внутри впитывающего захвата тонкими слоями на четырех ярусах нетканого материала, что обеспечивает свободное увеличение объема абсорбента при поглощении жидкостей.

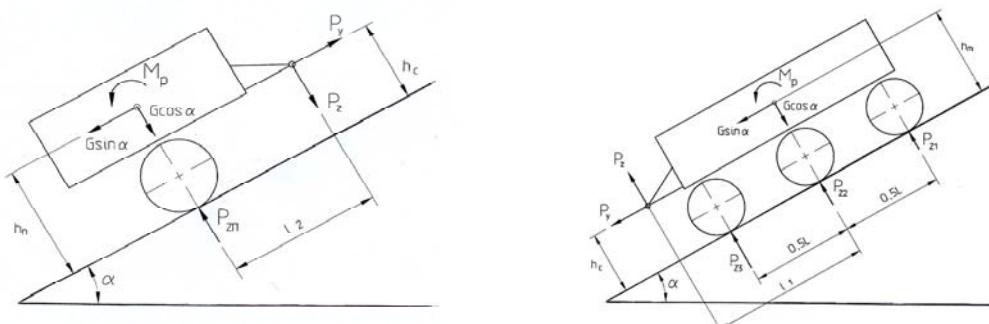
**Третья глава** посвящена созданию математических моделей и разработке методик расчета и проектирования активного прицепа, дезактивирующего захвата, клещевого отрывного механизма и пантографного отрывного механизма.

Проведение локализационных работ на больших площадях требует доставки в зону работ технологического оборудования и расходных материалов. Для решения дилеммы радикального увеличения грузоподъемности РТК и сохранения его проходимости и маневренности, автором, совместно со специалистами ООО «Актрон», была предложена концепция двухзвенного шарнирно-сочлененного РТК, включающего подвижный аппарат (тягач) и активный прицеп с колесной формулой 2×2 [1]. Концепция двухзвенного РТК предусматривает возможность как совместного, так и независимого дистанционного управления прямолинейным движением и поворотом его составных частей. Для выбора параметров прицепа и оценки его совместимости с тягачом в прямолинейном движении и бортовом повороте был проведен расчетно-теоретический

анализ тягово-динамических характеристик робототехнического комплекса, тягачом которого является подвижный аппарат КРТ-100М.

Учитывая малые скорости РТК рассматриваемого класса, решение задач тяговой динамики можно делать в статической постановке. При этом задачи расчета прямолинейного движения сводятся к проверке соответствия требуемой и максимально допустимой грузоподъемности прицепа и оценке максимального преодолеваемого подъема при движении в сцепке. Расчетная схема приведена на рис. 3, где  $\alpha$  - угол подъема;  $G_T, G_{II}$  – полный вес соответственно тягача и прицепа;  $h_T, h_{II}$  – высота центра тяжести соответственно тягача и прицепа;  $P_{zi}, P_{zII}$  – нормальные реакции грунта на колеса тягача ( $P_{zi}$ ) и прицепа ( $P_{zII}$ );  $P_f$  – сила сопротивления качению колеса;  $h_c$  – высота поперечной оси шарнира сочленения прицепа с тягачом;  $P_y, P_z$  – реактивные усилия в шарнире сочленения;  $M_p$  – реактивный крутящий момент привода;  $L$  – продольная база тягача;  $l_1, l_2$  – расстояние от оси шарнира сочленения соответственно до оси среднего колеса тягача и до оси колес прицепа.

Проверку соответствия требуемой и допустимой грузоподъемности прицепа производим, исходя из условия  $P_y = 0$ . Физически это означает, что активный



(а) Схема сил, действующих на прицеп (б) Схема сил, действующих на тягач

Рис. 3. Расчетная схема для тягово-динамического проверочного расчета прямолинейного движения КРТ-100М с активным прицепом.

прицеп не ограничивает тяговых возможностей тягача, самостоятельно преодолевая максимальные подъемы. В соответствии с принятой концепцией прицепа и расчетной схемой это возможно, если  $P_{zII} = P_{z3}$  при максимально допустимом полном весе прицепа. В этом случае идентичны и режимы нагружения колеса прицепа и кормового колеса тягача, а следовательно и режимы соответствующих электродвигателей. Физически это отражает тот факт, что скорость двухзвенного РТК определяется частотой вращения вала электродвигателя наиболее загруженного привода кормового колеса. При этом вводится допущение о полной идентичности механических характеристик тяговых электродвигателей и приводов в целом

Учитывая изложенное, принимая допущение об идентичности упругих характеристик подвесок всех колес тягача, и рассматривая отдельно уравнения действующих сил и моментов от них, относительно оси колеса прицепа и оси средних колес тягача, получаем для прицепа:

$$P_{zII} = 0,5G_{II} \left( \cos \alpha \frac{l_2}{l_2 - rf} + \sin \alpha \frac{h_n}{l_2 - rf} \right), \tag{2}$$

$$P_z = G_{II} \left( \cos \alpha \frac{rf}{l_2 - rf} + \sin \alpha \frac{h_p}{l_2 - rf} \right), \tag{3}$$

и для тягача:

$$P_{z3} = G_T \left[ \cos \alpha \left( \frac{1}{6} + \frac{fr}{2L} \right) + \sin \alpha \frac{h_T}{2L} \right] - P_z \left( \frac{1}{6} + \frac{l_1 + rf}{2L} \right). \tag{4}$$

Второе слагаемое в (4) отражает положительное влияние активного прицепа на перераспределение нормальных реакций тягача. Прицеп способствует разгрузке кормовых колес, улучшая тем самым тяговые возможности двухзвенного РТК в целом.



Максимальный преодолеваемый угол подъема определяется из известного соотношения  $\varphi > f + \operatorname{tg}\alpha$ . (5)

Принимая для расчета  $f = 0,2$  и  $\varphi = 0,6$  из уравнений (2, 3, 4, 5) получаем, что, например при  $G_T = 900$  кГ, соотношение  $P_y = 0$  выполняется при  $G_{II} = 300$  кГ, а максимальный преодолеваемый угол на кварцевом песке ограничен  $\alpha = 22^\circ$ . На сухом бетоне возможно преодоление подъемов большей крутизны.

Особенности расчета криволинейного движения.

Поскольку тягач КРТ-100М имеет нерегулируемый тяговый привод, изменение направления движения сцепки осуществляется в два приема. Сначала тягач и прицеп разворачиваются на месте относительно друг друга, а затем тягачу и прицепу подается команда на прямолинейное движение в новом направлении. Первая операция является бортовым поворотом, когда колеса бортов вращаются в противоположных направлениях, причем левое колесо прицепа должно вращаться как колесо правого борта тягача, а правое колесо прицепа как левое колеса тягача. Вторая операция представляет собой выход прицепа из поворота, когда тягач движется прямолинейно, а прицеп, также работающий в режиме прямолинейного движения, доворачивается, подстраиваясь к следовой дорожке тягача. Анализ криволинейного движения проводится с целью оценки влияния активного прицепа на характеристики поворота сцепки на каждом из рассмотренных этапов. Для первого этапа можно записать следующее соотношение (рис. 4):

$$\omega_T l_1 = \omega_{II} l_2, \quad (6)$$

где  $\omega_T, \omega_{II}$  - угловые скорости поворота соответственно тягача и прицепа.

По данным ходовых испытаний различных макетов в ОАО «ВНИИТрансмаш» можно предположить, что для отстающего борта прицепа  $\delta_{II} \approx 0$ , а для крайних колес отстающего борта тягача, определяющих  $\omega_T$ ,  $\delta_T \approx 0,2$ , где  $\delta_T$  – коэффициент буксования. Поскольку

$$\omega_T = \frac{V_{ок}(1 - \delta_T)}{0,5}; \quad \omega_{II} = \frac{V_{ок}(1 - \delta_{II})}{0,5}, \quad (7)$$

то уравнение (6) запишется в виде

$$(1 - \delta_{II}) = (1 - \delta_T) l_1 / l_2. \quad (8)$$

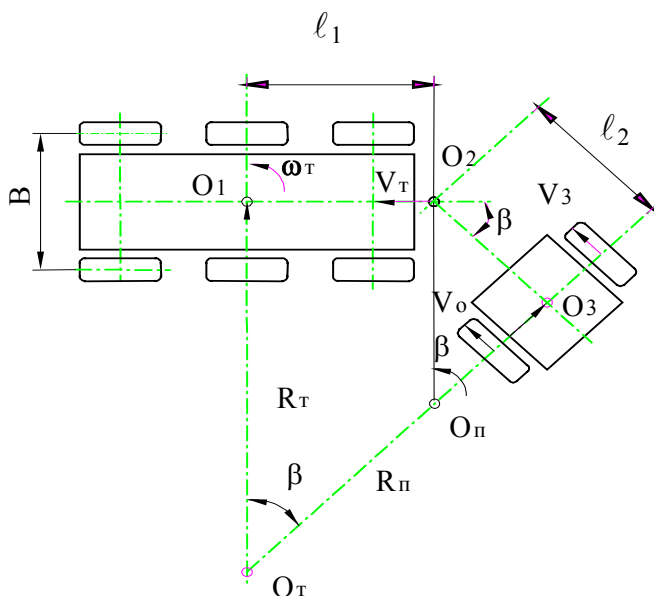


Рис. 4. Кинематическая схема тягача и прицепа в режиме криволинейного движения.

и, следовательно, при заданных значениях  $\delta_{\Pi}$  и  $\delta_T$   $l_1 = 1,25 l_2$ , что близко к проектным характеристикам ( $l_1=1,24$  м,  $l_2=0,99$  м). Для такого соотношения зависимость коэффициентов буксования колес тягача и прицепа представляется формулой:

$$\delta_{\Pi}=1,25\delta_T-0,25. \quad (9)$$

При анализе режима выхода из поворота большой практический интерес представляет величина допустимого угла излома сочлененной рамы двухзвенного РТК, который на рис. 4 обозначен  $\beta$ . В соответствии с рис. 4 мгновенное положение центра поворота прицепа  $R_{\Pi}$  определяется по зависимости:

$$R_{\Pi} = \frac{l_2}{\operatorname{tg}\beta}, \quad (10)$$

где  $\beta$  - угол излома рамы тягач-прицеп.

Мгновенное значение угловой скорости прицепа относительно шарнирного узла сочленения  $O_2$

$$\omega_{\Pi} = \frac{V_T \sin \beta}{l_2}. \quad (11)$$

Скорость точки рамы прицепа забегающего борта, лежащей на нормали к поверхности, исходящей из зоны контакта колеса с поверхностью равна:

$$V_3 = (R_{\Pi} + 0,5B)\omega_{\Pi}$$

или с учетом (10) и (11)

$$V_3 = V_T \left( \cos \beta + \frac{0,5B}{l_2} \cdot \sin \beta \right). \quad (12)$$

Аналогично для отстающего борта

$$V_0 = V_T \left( \cos \beta - \frac{0,5B}{l_2} \cdot \sin \beta \right) \quad (13)$$

Для колеса забегающего борта прицепа, коэффициент буксования равен

$$\delta_3 = 1 - V_3 / V_{ок.3}, \quad (14)$$

где  $V_{ок.3}$  - окружная скорость колеса, реализуемая приводом. Скорость тягача  $V_T$  запишется в виде

$$V_T = V_{ок.T} (1 - \delta_T) \quad (15)$$

где  $V_{ок.T}$  - усредненное значение окружной скорости колес тягача реализуемая их тяговыми приводами;  $\delta_T$ - усредненный коэффициент буксования колес тягача.

Тогда, с учетом (12) и (15), уравнение (14) запишется в виде:

$$\delta_3 = 1 - \frac{V_{ок.T}(1 - \delta_T)}{V_{ок.3}} \left( \cos \beta + \frac{0,5B}{l_2} \sin \beta \right) \quad (16)$$

Аналогично для отстающего борта прицепа

$$\delta_0 = 1 - \frac{V_{ок.T}(1 - \delta_T)}{V_{ок.0}} \left( \cos \beta - \frac{0,5B}{l_2} \sin \beta \right) \quad (17)$$

В уравнениях (16) и (17) соотношения  $\frac{V_{OK.T}}{V_{OK}}$  отражает внешнюю характеристику тягового привода, для которой  $n_k^{max} \approx 1,18n_k^{nom}$ .

Из результатов расчета следует:

- колеса забегающего борта прицепа в режиме выхода из поворота на несвязном грунте перемещаются практически при  $\delta_3 = 0$  т.е. в пассивном режиме, а на связном грунте (бетон) при  $\delta_3 < 0$ , т.е. как ведомые заторможенные;

- колеса отстающего борта перемещаются при интенсивном буксовании.

Так как  $\beta \approx 50^\circ$ , коэффициент  $\delta_0=1$ , то колесо не двигается и вокруг него происходит разворот прицепа. При  $\beta > 50^\circ$  отстающее колесо перемещается по грунту в сторону, противоположную его вращению, что недопустимо. Чтобы обезопасить сцепку от такой ситуации угол излома рамы при реализации бортового поворота тягача и прицепа не должен превышать в данном случае  $\beta \leq 25^\circ$ . При этом отстающее колесо прицепа на несвязном грунте будет буксовать с  $\delta_0 \approx 0,5$ .

Расчет навесного оборудования.

Автором было предложено создать навесные приспособления, радикально снижающие нагрузку на манипулятор РТК и замыкающие отрывные усилия дезактивирующего захвата между его рамкой и очищаемой поверхностью. Для расчетно-теоретической проверки работоспособности предложенных изделий и расчета нагрузок на манипулятор РТК были разработаны математические модели дезактивирующего захвата, клещевого отрывного механизма и пантографного отрывного механизма.

Клещевой отрывной механизм состоит из двух самоустанавливающихся клиновидных лап, которые производят отрыв дезактивирующего захвата от поверхности, внедряясь под его рамку за счет усилий сжатия губок схвата манипулятора. Изложены допущения, принятые при разработке математической модели клещевого отрывного механизма. С помощью разработанной математической модели была установлена зависимость усилий сжатия схвата манипулятора от отрывного усилия дезактивирующего захвата и сопротивления перемещению клиновидной лапы по очищаемой поверхности.

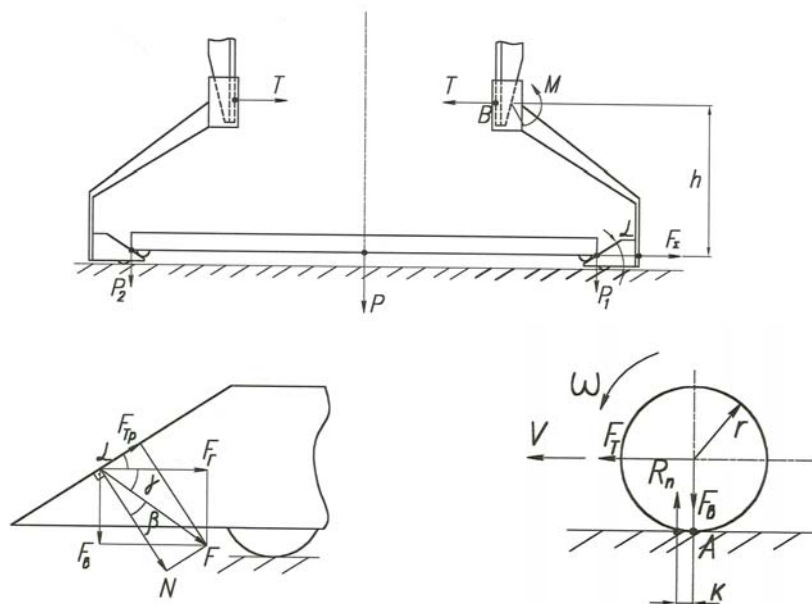


Рис 5. Расчетная схема для определения усилий при отрыве захвата. Полученная зависимость, при  $f = 0,2$  выражается формулой:

$$F_{\Sigma} = \left[ \cos(78,7^\circ - \alpha) + \frac{K}{r} \sin(78,7^\circ - \alpha) \right] \frac{0,51 P}{\cos \alpha},$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения;  $P$  – отрывное усилие захвата;  $\alpha$  - угол клиновой поверхности;  $K$  – коэффициент трения качения;  $r$  – радиус опорного ролика;  $F_{\Sigma}$  - усилие на губке схвата манипулятора. На основании проведенных расчетов были выработаны проектные рекомендации для клещевого отрывного механизма. Данный механизм позволяет производить отрыв дезактивирующих захватов при грузоподъемности манипулятора втрое меньшей, чем их отрывное усилие.

Для оптимизации конструктивных характеристик дезактивирующего захвата и выявления закономерностей изменения отрывных усилий при его подъеме запрокидыванием была разработана математическая модель, позволяющая с достаточной степенью приближения рассчитать отрывные усилия в зависимости от угла подъема рамки захвата.

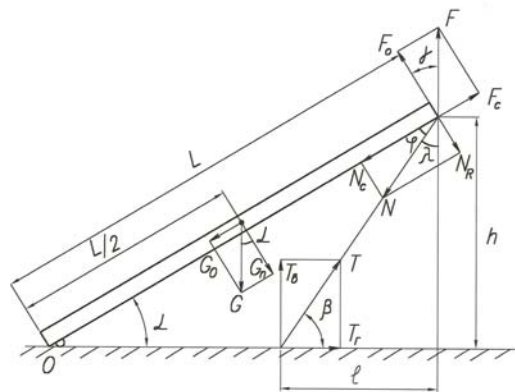


Рис 6. Расчетная схема дезактивирующего захвата.

Зависимость усилий на зубе отрывного механизма от угла подъема рамки захвата выражается формулой:

$$F = \frac{N \sin (\beta - \alpha) + 0,5G}{\cos \alpha},$$

где  $F$  – усилие отрывного механизма;  $N$  – усилие отрыва армированной пленки;  $G$  – вес рамки захвата;  $\alpha$  - угол подъема рамки захвата;  $\beta$  - угол между армированной пленкой и поверхностью. С использованием полученных ранее эмпирических зависимостей были получены расчетные усилия достаточно близко совпадающие с данными экспериментальных исследований и позволившие подтвердить вывод о том, что в данном случае отрывные усилия резко уменьшаются по достижении высоты подъема 50 мм. Так как использование клещевого отрывного механизма в ряде случаев может быть затруднено, то автором была предложена конструкция пантографного отрывного механизма, повышающая эффективность использования РТК в затесненных условиях.

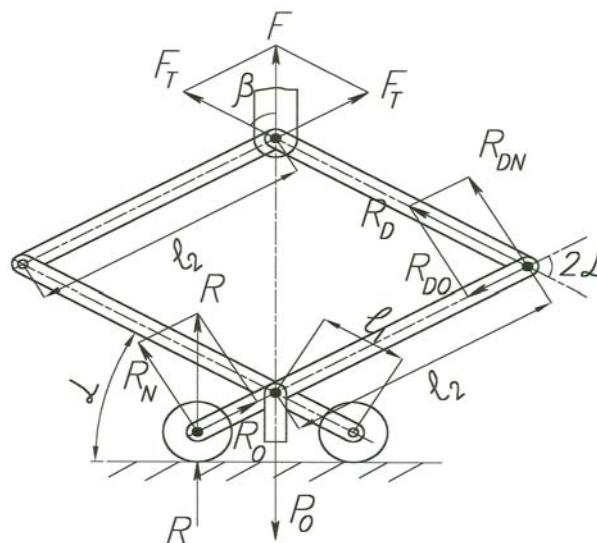


Рис 7. Расчетная схема пантографного механизма.

Принцип работы данного навесного приспособления для РТК основан на использовании двуплечего рычага, приводимого в движение манипулятором при помощи шарнирно-сочлененного ромбоида. С целью оптимизации конструктивных характеристик и определения нагрузок на схват манипулятора была разработана математическая модель пантографного отрывного механизма.

С помощью разработанной математической модели была установлена зависимость усилия на схвате манипулятора от угла раскладывания ромбоида, выражающаяся следующей формулой:

$$F = \frac{P_0 \times l_1 (\cos\alpha + \mu \sin\alpha)}{l_2 \sin 2\alpha / \sin\alpha + l_1 (\cos\alpha + \mu \sin\alpha)},$$

где  $F$  – усилие на схвате манипулятора;  $P_0$  – отрывное усилие дезактивирующего захвата;  $l_1$  – длина нижнего плеча рычага;  $l_2$  – длина рычагов ромбоида;  $\mu = K/r$  – конструктивный параметр, определяемый отношением коэффициента трения качения к радиусу ролика;  $\alpha$  – угол между рычагом и поверхностью. Расчеты показали, что пантографный механизм обеспечивает пятикратный выигрыш в силе при подъеме рамки дезактивирующего захвата на высоту до 50 мм.

**Четвертая глава** посвящена методике и результатам комплексных испытаний РТК с навесным и прицепным оборудованием, разработанным на основе результатов данной работы и внедрению этого оборудования в эксплуатацию. Испытания проводились в производственных помещениях и на открытых площадках ИТУЦР, АТЦ г. Сарова и АТЦ г. Снежинска. Они подтвердили высокую эффективность и надежность навесного и прицепного оборудования для локализации и дезактивации радиоактивных просыпей и проливов.



Фото 1. КРТ-100М с активным прицепом.

В процессе испытаний были выявлены преимущества дистанционно-управляемого пистолета-распылителя локализирующих полимерных композиций, применение которого исключает вторичный разнос загрязнений под действием реактивного эффекта распыляемых жидкостей.

Испытание дезактивирующего захвата в условиях максимально приближенных к реальным показало, что коэффициент дезактивации по изотопу  $Ce-144$  составил 447.

Впитывающий захват испытывался на концентрированных кислотах, водных растворах щелочей, солей и органических растворителях, которые широко применяются на промышленных объектах. По всем перечисленным жидкостям была подтверждена проектная впитывающая способность захвата 200 ÷ 800 и отсутствие вторичного прокапывания.

Были также получены результаты, подтверждающие корректность тягово-динамического расчета двухзвенного РТК с активным прицепом. Тяговые характеристики системы тягач-прицеп проверялись на бетонном погрузочном пандусе с уклоном  $27^\circ$  с максимальной полезной нагрузкой прицепа 150 кГ и при преодолении препятствий в виде обломков строительных конструкций. Во всех случаях наличие активного прицепа положительно отражалось на проходимости подвижного аппарата РТК.

По результатам испытаний были выработаны рекомендации по повышению эффективности РТК при сборе радиоактивных просыпей и проливов за счет автоматизации рутинных процессов заливки полимерной композиции в дезактивирующий захват и его отрыва пантографным механизмом. Данные рекомендации были реализованы с использованием программируемого манипулятора РМ-02, установленного на шасси подвижного аппарата КРТ-100М.



Фото 2. КРТ-100М с манипулятором РМ-02 и гамма-локатором на испытаниях впитывающих захватов.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные в данной работе, формулируются следующим образом:

1. Выполнен анализ существующих методов локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений и обосновано использование метода снимаемых полимерных покрытий при проведении дистанционных работ с применением РТК.

2. Сформулированы основные критерии эффективности РТК для дистанционной локализации радиоактивных загрязнений и сбора радиоактивных просыпей и проливов.

3. Предложена новая роботизированная технология очистки поверхностей от загрязнений с применением РТК и одноразовых дезактивирующих захватов, позволяющая собирать с поверхности твердые радиоактивные просыпи, начиная от мелкодисперсных и заканчивая фрагментами сложной формы размером  $6 \times 20$  мм. при этом образование жидких радиоактивных отходов и дозовые нагрузки на персонал исключены.

4. Предложена новая роботизированная технология сбора проливов с применением РТК и одноразовых впитывающих захватов, позволяющая непосредственно на месте работ превращать собранные жидкости в твердые радиоактивные отходы за один технологический цикл, не превышающий 15 минут. Данная технология позволяет проводить дистанционные работы по сбору радиоактивных жидкостей от 1 мл до 800 мл независимо от характера их расположения на поверхности, при этом дозовые нагрузки на персонал и вторичное образование жидких радиоактивных отходов исключены.

5. Исследованы характеристики материалов и полимерных композиций для создания дезактивирующих и впитывающих захватов. Проведен выбор материалов и предложены решения по их оптимальному использованию в конструкциях захватов.

6. Исследован процесс роботизированного отрыва дезактивирующих захватов от поверхности и определены возникающие при этом усилия. Предложены методы отрыва захватов и кинематические схемы навесного оборудования, позволяющие оптимизировать характеристики РТК, даны проектные рекомендации по созданию этого оборудования, позволяющего реализовать описанные выше роботизированные технологии дезактивации.

7. Предложено новое принципиальное решение двухзвенного РТК с активным прицепом, отличающееся тем, что оно позволяет при значительном увеличении грузоподъемности не снижать проходимость в прямолинейном движении и свести к минимуму ограничения в режимах криволинейного движения.

8. Разработаны расчетные кинетостатические модели и методики для оценки тягово-динамических характеристик при прямолинейном и кинематических характеристик при криволинейном движении сцепки из тягача и активного прицепа на несвязных грунтах и твердом основании.

9. Разработаны математические модели дезактивирующего захвата, клещевого и пантографного отрывных механизмов, позволившие определить нагрузки на манипулятор РТК и оптимизировать конструктивные характеристики этих механизмов.

10. Положительные результаты испытаний нового навесного и прицепного оборудования в составе робототехнических комплексов подтвердили эффективность разработанных роботизированных технологий локализации и дезактивации, корректность расчетных моделей и обоснованность технических решений по конструкции оборудования.

11. Полученные в рамках данной работы экспериментальные данные и разработанные математические модели используются при разработке новых РТК для проведения дистанционных работ по ликвидации последствий радиационных инцидентов.

12. В настоящее время в действие введена базовая технологическая инструкция № ТИ-6-2004 по роботизированной локализации и дезактивации радиоактивных загрязнений и внедрено в эксплуатацию следующее дистанционно-управляемое оборудование для реализации описанных технологий: гамма-локаторы; устройства управления пистолетом-распылителем; активный прицеп КРТ-100М. По результатам работы подано 4 заявки на патентную защиту полезных моделей и 1 заявка на изобретение. По заявке на полезную модель устройства управления пистолетом-распылителем получен патент № 42345 РФ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Расчетно-теоретический анализ тягово-динамических характеристик прямолинейного движения и бортового поворота КРТ-100М с активным прицепом: Отчет о НИР (заключ.)/ООО «Актрон»; Руковод. работы М.И.Маленков. - № НТО-01-05-2001. – С.-П., 2001. – 26 с. – Исполн. Волов В.А., Кажукало И.Ф., Крусанов В.С., Кучеренко В.И., Сидоркин Н.А.

2. Гамма-локатор: Свидетельство на полезную модель 27716 РФ/Н.А.Сидоркин, С.И.Ястребов, А.А.Ершов, В.С.Крусанов, В.И.Горбачев, Ю.А.Прохоров, Д.Н.Фурсеев, М.Н.Фурсеев, С.В.Никитин, О.Н.Романов - № 2002115985/20; Заявл. 17.06.2002.

3. Маленков М.И., Федосеев С.В., Кучеренко В.И., Крусанов В.С., Сидоркин Н.А. Система робототехнических комплексов для инженерных аварийно-технических центров Минатома//Экстремальная робототехника: Материалы 12-ой науч.-практич.конф. 15-17 апреля 2002 г. – Санкт-Петербург, 2002. – С.26-32.

4. Development of the System of Robotic Complexes for Technical Centers of Russian Ministry of Atomic Industry. Koutcherenko V., Kashirin V., Malenkov M., Sidorkin N., Volov V. Proc.of the Conf. «Space and Robotics 2002», Alduquerque, USA, 2002.

5. Волов В.А., Кучеренко В.И., Маленков М.И., Каширин В.Н., Сидоркин Н.А., Крусанов В.С. Создание системы робототехнических комплексов для технических центров Минатома РФ//Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тез.докл.Пятой Всерос.науч.-практич.конф. 2-5 апреля 2002 г. – Санкт-Петербург, 2002. – С.318-320.

6. Сидоркин Н.А., Крусанов В.С. Навесное оборудование РТК для разведки, локализации мест радиационных аварий и дезактивации робототехнического оборудования//Экологическая и

информационная безопасность: международная конференция 8-12 сентября 2003 г. – Москва, 2003. – С.156-164.

7. В.С.Крусанов, Н.А.Сидоркин. Робототехника для разведки и дезактивации мест радиационных аварий//Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы для экстремальных условий: Материалы первого семинара. 2-4 октября 2003 г. – Санкт-Петербург, 2003. – С.46-52.

8. Сидоркин Н.А., Крусанов В.С. Навесное оборудование РТК для разведки, локализации мест радиационных аварий и дезактивации робототехнического оборудования//Экстремальная робототехника: 15-ая науч.-тех. конф. 6-7 апреля 2004 г. – Санкт-Петербург, 2004. – С.59-71.

9. О.Е.Козлов, В.С.Крусанов, Н.А.Сидоркин, А.Б.Ульянов, И.С.Феоктистов. Малогабаритный мобильный робот для проведения разведки и взятия проб материала на объектах Минатома//Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы для экстремальных условий: Материалы второго семинара. 4-6 октября 2004 г. – Санкт-Петербург, 2004. – С.133-134.

10. Способ дистанционной очистки поверхности от загрязнений: Заявка на изобретение РФ №2004117951/17 от 16.06.2004/Н.А.Сидоркин, В.С.Крусанов, О.И. Лихоманова, К.В.Щербаков, Н.М.Сорокин.

11. Механизм передачи движения исполнительного органа манипулятора робота: Патент на полезную модель № 42345 РФ от 02.04.2004/В.С.Крусанов

12. Съемная лапа для робота: Заявка на полезную модель РФ № 20044136396/В.С.Крусанов.

13. Съемный модуль для робота: Заявка на полезную модель РФ № 20044136394/В.С.Крусанов, К.В.Щербаков.

14. Дозирующее устройство импульсного действия: Заявка на полезную модель РФ № 20044136399/В.С.Крусанов, К.В.Щербаков.