

Корженевский Сергей Романович

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ НАНОСЕКУНДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ
ИНТРОСКОПИИ И СЕЛЕКТИВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
МИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ**

Специальность: 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург - 2008

Работа выполнена в Институте электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург.

Научный руководитель: доктор технических наук Филатов А.Л.

Официальные оппоненты: доктор технических наук Гаврилов Н.В.
(Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург)

доктор технических наук, профессор Евтушенко Г.С.
(Томский политехнический университет, г. Томск)

Ведущая организация: Уральский государственный технический университет,
кафедра экспериментальной физики, г. Екатеринбург

Защита состоится 2 декабря 2008 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета

Д 004.024.01 в Институте электрофизики УрО РАН по адресу:

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электрофизики УрО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Сюткин Н.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Наносекундные высоковольтные генераторы с частотой следования импульсов до 10 кГц (высокочастотные генераторы), использующие эффект наносекундного обрыва тока высокой плотности в полупроводниковых диодах, с твердотельной системой коммутации - новый класс мощной импульсной техники. Мощные полупроводниковые прерыватели тока (ППТ), впервые представленные в 1991 г., превосходят по стабильности выходных параметров, частоте следования импульсов, как плазменные прерыватели тока, так и прерыватель тока на основе электрически взрывааемых проводников и обладают практически неограниченным ресурсом работы. Данные преимущества ППТ способствуют созданию высоковольтных генераторов с высокими потребительскими свойствами и их внедрению в различные области деятельности человека.

Одна из традиционных сфер применения высоковольтной импульсной техники – генераторы рентгеновского излучения. Востребованность в этой области мощных легких источников питания рентгеновских трубок обусловлена необходимостью оперативного проведения интроскопии в нестационарных условиях. Серийно выпускаемые на сегодняшний день малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты (ИРА) характеризуются довольно низкой частотой следования импульсов – на уровне десятков герц и средней мощностью на уровне сотен ватт, что определяется конструктивными особенностями источника питания и рентгеновской трубки. Эти обстоятельства определяют значительные времена получения снимков при решении дефектоскопических задач и делают проблематичным применение ИРА для проведения медицинских диагностических исследований.

Другой перспективной областью использования высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов импульсов является разрушение твердых тел с размерами частиц менее 100 мкм. На сегодняшний день накопились миллионы тонн подобного

материала, остающегося в отвалах горно-обогатительных комбинатов (ГОК). В этих частицах высока концентрация полезных ископаемых, но их дальнейшее извлечение традиционными методами либо экономически нецелесообразно, либо просто невозможно из-за проблем переработки. В то же время известно, что электрический пробой жидкости создает ударные волны способные разделять рудные конгломераты. Также известно, что минимальный размер тела, которое возможно разрушить ударной волной, создающей усилия сжатия, растяжения и сдвига, определяется произведением времени нарастания давления и скорости звука в твердом теле. Следовательно, для разрушения твердых частиц микронных размеров необходимо создать ударные волны, возбуждаемые при электрическом разряде в жидкости с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности, для чего оптимально подходят высоковольтные наносекундные генераторы импульсов.

Таким образом, разработка мощных компактных высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов с полностью твердотельной системой коммутации для промышленного и медицинского использования является **актуальной задачей**. Для реализации достоинств подобных генераторов в интроскопии необходимо создание импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, способной выдержать тепловые нагрузки при средней мощности 1-2 кВт в электронном пучке за время экспозиции и обладающей малым размером фокусного пятна. Кроме того, отсутствие к началу работы данных о применении высоковольтных генераторов с импульсами наносекундной длительности для наносекундного пробоа жидкости, содержащей микрочастицы твердых тел (пульпы), требует проведения исследований в этих направлениях.

Цель работы

1. Разработка мощных компактных высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов с полностью твердотельной системой коммутации для промышленного и медицинского использования.

2. Исследование воздействия ударных волн, возбуждаемых при электрическом разряде в пульпе с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности, на твердые материалы с размерами частичек от единиц до сотен микрометров.
3. Создание острофокусной импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки с увеличенной средней мощностью, рассеиваемой на аноде, и стабильной генерацией рентгеновского излучения при скорости нарастания импульса напряжения менее $1 \cdot 10^{13}$ В/с.

Научная новизна

1. Предложен и реализован эффективный способ разрушения частиц твердого материала размером менее 100 мкм с помощью ударных волн, возбуждаемых при электрическом разряде в пульпе с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности.
2. Показано, что снижение удельной импульсной мощности электронного пучка, бомбардирующего вольфрамовый анод рентгеновской трубки, ведет к увеличению допустимой средней мощности, рассеиваемой на аноде, при сохранении размера эффективного фокусного пятна.
3. Разработан металлокерамический катод острофокусной импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, позволяющий получить стабильную эмиссию электронов из нескольких центров одновременно при скорости нарастания импульса напряжения менее $1 \cdot 10^{13}$ В/с.
4. Установлено, что применение в медицине высокочастотных импульсных рентгенодиагностических аппаратов, формирующих импульсы длительностью менее 100 нс, при условии использования фотографических приемников излучения с рентгенолюминесцентными усиливающими экранами, снижает поглощенную

дозу в несколько раз, по сравнению с рентгенодиагностическими аппаратами постоянного тока.

Практическая ценность работы

1. Создана высоковольтная импульсная установка «Пирит-2» с амплитудой импульсов высокого напряжения – 150 кВ на нагрузке 95 Ом, длительностью импульса 5 нс и частотой следования импульсов до 1 кГц, позволяющая разрушать в пульпе частицы твердого материала с размерами от единиц до сотен микрометров.
2. Разработаны и внедрены на промышленных предприятиях компактные импульсные рентгеновские дефектоскопы РУП-300-Ш и «ПИРАТ» с полностью твердотельной системой коммутации напряжением 325 кВ и 210 кВ, весом 25 кг и 9 кг и удельной мощностью 36 Вт/кг и 20 Вт/кг, соответственно, что в 2 – 3 раза выше, чем у лучших аналогов.
3. Разработана и выпущена серия медицинских импульсных высокочастотных наносекундных рентгеновских диагностических палатных аппаратов «Ясень-01» выходной мощностью 1,5 кВт с полностью твердотельной системой коммутации и весом 45 кг, что в 1,5-2 раза легче лучших зарубежных аналогов.
4. Разработаны и серийно выпускаются взрывоэмиссионные наносекундные импульсные рентгеновские трубки РИА1-120 для дефектоскопии и медицинской диагностики с максимально допустимой мощностью, рассеиваемой на аноде до 1500 Вт.
5. Разработан способ деления на блоки генератора высоковольтных импульсов, состоящего из тиристорного преобразователя и магнитного генератора (2 – 3 звена сжатия) с ППТ в оконечном каскаде, с выделением в отдельный блок последнего звена магнитного генератора, при длительности импульса передачи энергии от предыдущих звеньев на уровне сотен наносекунд. Это позволяет конструировать

излучатель рентгеновского аппарата, состоящий из последнего звена сжатия магнитного генератора, ППТ и рентгеновской трубки, в виде моноблока.

На защиту выносятся положения

1. Ударные волны, возбуждаемые при электрическом разряде в пульпе с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности, эффективно разрушают частицы твердого материала размером менее 100 мкм.
2. Металлокерамический взрывоэмиссионный катод в импульсных наносекундных рентгеновских трубках в отличие от металлического катода позволяет получать стабильную взрывную эмиссию электронов из нескольких центров одновременно при скорости нарастания импульса напряжения менее $1 \cdot 10^{13}$ В/с.
3. Наносекундные импульсные электронные пучки, при удельной импульсной мощности не более 2 МВт/мм^2 , не вызывают эрозии анода, изготовленного из вольфрама, что позволяет получить среднюю мощность, рассеиваемую на аноде, на уровне 1,5 кВт, при диаметре эффективного фокусного пятна 1,5 - 2 мм и ресурсе работы трубки более 10^6 импульсов.
4. Применение импульсных наносекундных высокочастотных рентгеновских аппаратов, формирующих импульсы длительностью менее 100 нс, для медицинской диагностики, при использовании фотографических приемников излучения с рентгенолюминесцентными усиливающими экранами, снижает поглощенную дозу в 9 – 30 раз, по сравнению с аппаратами постоянного тока.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 10-th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM USA, 1995; 11-th Int. Conf. On High Power Particle Beams, Prague, Czech Republic, 1996; 11-th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, MD USA, 1997; 12-th International Conference on High-Power Particle Beams. Haifa, Israel, 1998; межрегиональной научно-технической конференции «Проблемы

геологии и разведки месторождений золота, извлечения благородных металлов из руд и отходов производства». Екатеринбург, 17-19.11.1999; 10 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. Москва. 1-7 апреля 2004 г; 15-th International Conference on High-Power Particle Beams. Saint-Petersburg, Russia, 2004.

Публикации

Основные результаты исследований изложены в 18 научных трудах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных журналах. По результатам работы получено 5 патентов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 70 наименований. Работа содержит 135 страниц печатного текста, 66 рисунков и 13 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследований, кратко излагается содержание глав, отмечается научная новизна работы.

В первой главе, состоящей из трех разделов, приведен обзор литературных данных и рассмотрены области применения высоковольтных генераторов наносекундных импульсов, связанные с темой диссертации. Рассмотрены проблемы, возникающие при эксплуатации высоковольтных импульсных генераторов, и определены задачи исследований.

В первом разделе рассмотрены электрогидравлический (ЭГ) и электроимпульсный (ЭИ) методы обработки материалов. Определены технические требования к генератору высоковольтных импульсов для обеспечения эффективной обработки частиц твердого тела определенных размеров. Показано, что для эффективного измельчения частиц твердых тел с размером менее 100 мкм требуются импульсы наносекундной длительности.

Во втором разделе дается краткое описание импульсных рентгеновских трубок (ИРТ), созданных в разные годы различными коллективами. Рассмотрены серийно выпускаемые ИРТ серии ИМА. Показано, что конструктивные особенности данных ИРТ приводят к амплитудной и пространственной нестабильности рентгеновского излучения, значительному увеличению эффективного рентгеновского фокуса при удалении от оси трубки, необходимости обеспечения скорости нарастания напряжения на уровне 10^{14} В/с для получения взрывной эмиссии электронов с металлического катода и ограничению средней выходной мощности на уровне сотен ватт. Определены основные требования к ИРТ для повышения эксплуатационных качеств импульсных рентгеновских аппаратов (ИРА).

В третьем разделе сделан обзор наносекундных высоковольтных генераторов рентгеновского излучения, созданных по схеме с промежуточным емкостным (ЕНЭ), или промежуточным индуктивным накопителем энергии (ИНЭ). Показано, что создание ИРА с промежуточным ИНЭ с ППТ позволяет создать аппараты с высокими эксплуатационными свойствами. Определено, что перспективными направлениями развития данных ИРА являются создание переносного дефектоскопического оборудования, с просвечивающей способностью на уровне 40 мм стали, и палатных медицинских рентгенодиагностических аппаратов, весом не более 50 кг.

Вторая глава посвящена разработке способа и созданию опытной установки для селективного раскрытия тонких включений из твердых минералов с помощью наносекундных высоковольтных генераторов.

На момент начала работы отсутствовали литературные данные о формировании ударных волн в жидкости с помощью высоковольтных генераторов с импульсами наносекундной длительности для разрушения твердых тел. Имевшиеся данные об использовании для подобных целей генераторов с импульсами микросекундной длительности, позволили предположить возможность разрушения частиц твердых тел

размером менее 100 мкм с помощью наносекундных импульсов. В первом разделе рассматривается создание наносекундного высоковольтного генератора «Пирит» с полностью твердотельной системой коммутации, формирующего импульсы напряжения амплитудой 185 кВ и длительностью на полувывсоте 30 нс, для проверки данного предположения. Электрическая схема генератора приведена на рис 1.

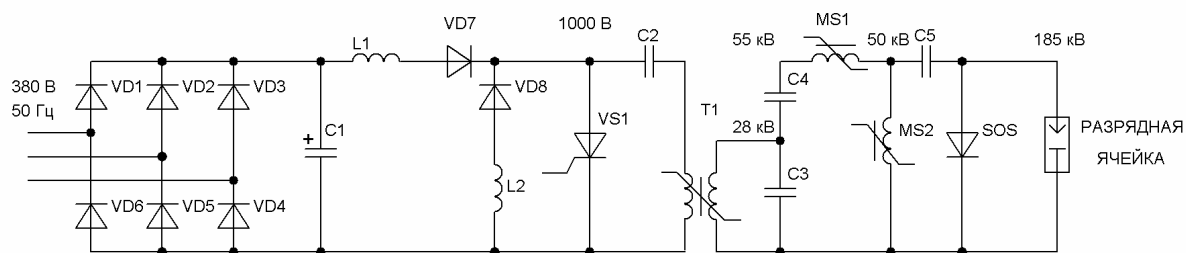


Рис. 1. Электрическая схема генератора «Пирит»

Эксперименты по исследованию эффективности дробления частиц с размерами менее 100 мкм, описанные во втором разделе, проведены на пиритосодержащих хвостах Учалинского месторождения, с содержанием золота 1 гр/т (свободного золота менее 5-8%). Для проведения работы собрана экспериментальная установка на базе генератора «Пирит». В результате экспериментов самородные частицы освобождены на 100%, что полностью подтверждает прогноз: импульсами наносекундной длительности возможно проводить расщепление минералов микронных размеров.

Третий раздел посвящен оптимизации выше описанной установки с целью снижения энергозатрат и возможности применения метода в промышленных условиях. В результате изучения развития электрического разряда в жидкости и распространения ударной волны, во-первых, создана электроизоляционная разрядная ячейка, позволяющая обрабатывать поток пульпы и ограничивающая область обработки пульпы зоной, в которой воздействие на обрабатываемый материал превышает предел прочности. Во-вторых, создан генератор высоковольтных импульсов (ГВИ) «Пирит-2» с полностью твердотельной системой коммутации, формирующий импульсы напряжения

длительностью на полувывсоте менее 5 нс. Осциллограммы импульсов, создаваемых генератором «Пирит-2», приведены на рис. 2.

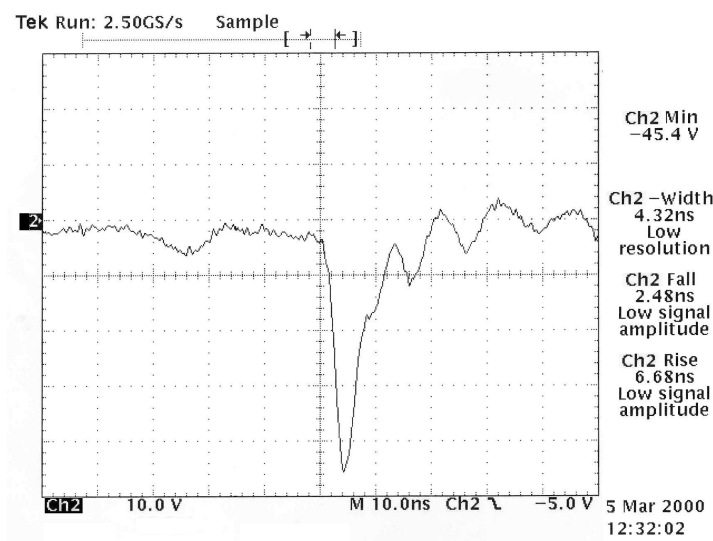


Рис. 2. Осциллограмма выходного напряжения генератора «Пирит-2» на нагрузке 95 Ом. Амплитуда напряжения – 154 кВ, развертка - 10 нс/дел

В четвертом разделе описывается оптимизированная опытная установка, и рассматриваются результаты экспериментов. Показано, что обработка пульпы с помощью электрических разрядов в жидкости повышает извлекаемость золота на 70%. При этом, за счет увеличения активности растворения сульфидов в воде, вызванного образованием новых поверхностей и озонированием воды электрическими разрядами, пульпа после обработки содержит до 0,8 г/л ионов цинка и до 2 г/л железа. По меди полученный раствор в 16 раз превышает минимальное содержание, пригодное для промышленной добычи (0,05 г/л). Таким образом, раствор является обогащенной жидкой рудой.

Разрушение частиц пирита подтверждается ростом удельной поверхности материала на 25%. Кроме того, минералогический анализ обработанного пирита показал наличие сколов пирита и, что особенно интересно, увеличение числа частиц класса 1-3 мкм до 5-8%, при исходном содержании 0,5-0,8%. На данной установке были проведены испытания по дезинтеграции различных материалов – слюды с частицами размером от

100-300 мкм, кремния с размерами частиц от 10 до 500 мкм и др. Во всех испытаниях наблюдалось увеличение удельной поверхности материалов на 15-60%.

В пятом разделе главы по результатам проведенной работы сделаны выводы:

1. разработан способ селективного раскрытия тонких включений путем обработки потока пульпы, состоящей из материала, находящегося в жидкости, высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя;
2. для повышения эффективности раскрытия тонких включений зону обработки пульпы следует ограничить электроизоляционной разрядной ячейкой, с двумя электродами. Расстояние между электродами выбирается из условия пробоя пульпы, а диаметр ячейки выбран равным расстоянию между электродами;
3. создана опытная установка для селективного раскрытия тонких включений и измельчения твердых материалов высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя, с частотой следования импульсов в сотни герц и длительностью импульса менее 10 нс.

Третья глава посвящена разработке отпаянной импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки РИА1-120 для медицинских рентгенодиагностических аппаратов.

Первый раздел посвящен созданию ИРТ РИА1-120. Предложена конструкция металлокерамического катодного узла, позволяющая получать стабильную взрывную эмиссию электронов из нескольких центров одновременно, расположенных по окружности катода, при скорости нарастания импульса напряжения на уровне 10^{13} В/с. Проведена оценка стабильности радиационного выхода путем сравнительных испытаний промышленной рентгеновской трубки ИМА-6 и разработанной РИА1-120.

Во втором разделе описывается создание, на основе анализа тепловых процессов и полученных экспериментальных данных, новой рентгеновской трубки РИА1-120-3, отличающейся от предыдущей трубки конструкцией анодного узла. Испытания трубки

РИА1-120-3 показали увеличение допустимой средней мощности с 250 Вт до 600 Вт в типовых режимах эксплуатации для медицинской диагностики.

Основная причина, снижающая ресурс трубки – эрозия анода из-за нагрева поверхностных слоев потоком электронов, бомбардирующих анод. Явление передачи теплоты в самом общем виде описывает дифференциальное уравнение теплопроводности

$$dt / d\tau = a \Delta t + W/c\rho,$$

где t – температура, τ – время, a – коэффициент температуропроводности, W – мощность, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность, Δ – оператор Лапласа.

Как видно из данного уравнения, нагрев поверхности анода определяется мощностью электронного пучка, а охлаждение зависит от коэффициента температуропроводности. В тоже время известно, что температуропроводность вольфрама монотонно уменьшается с увеличением температуры. Следовательно, уменьшение импульсной мощности электронного пучка приводит к снижению значения температуры нагрева поверхностного слоя во время импульса, и, как следствие, сохранению высокого значения коэффициента температуропроводности, причем изменение температуры между импульсами экспоненциально зависит от температуропроводности, $\Delta T \sim \exp(-a)$. Следовательно, в результате снижения удельной импульсной мощности пучка скорость охлаждения поверхности анода существенно увеличивается, что позволяет уменьшить эрозию анода и повысить среднюю мощность ИРТ.

Испытания трубки РИА1-120-3, при уменьшении удельной импульсной мощности пучка с 5,8 МВт/мм² до 1,8 МВт/мм², показали увеличение допустимой средней мощности с 600 Вт до 1600 Вт в типовых режимах эксплуатации медицинских диагностических аппаратов, рис. 4.

В третьем разделе представлено измерение дозовых характеристик трубки РИА1-120-3 и описывается экспериментальная вакуумная установка с безмасленной системой откачки для испытаний узлов ИРТ. Эксперименты показали сохранение дозы одиночного

импульса и линейное повышение мощности дозы, при увеличении частоты следования импульсов до 4 кГц, рис. 5.

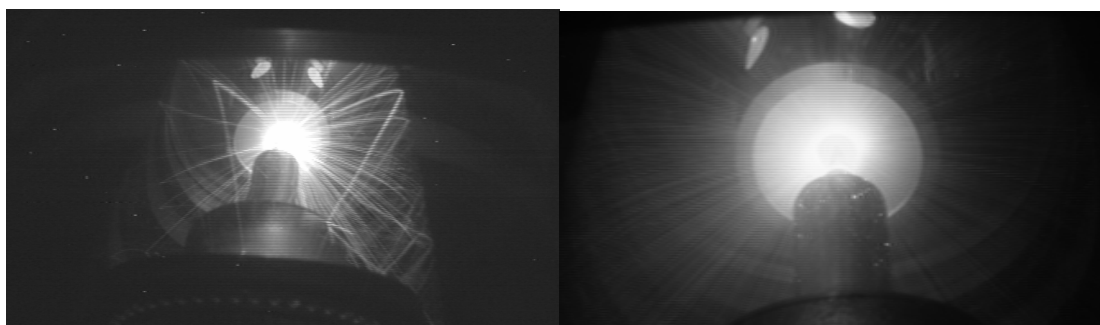


Рис. 4. Эрозия анода трубки РИА1-120-3, слева - частота следования импульсов 600 Гц, энергия в импульсе 0,7 Дж, удельная импульсная мощность пучка электронов 5,8 МВт/мм², справа - частота следования импульсов 1000 Гц, энергия в импульсе 0,4 Дж, удельная импульсная мощность пучка электронов 1,8 МВт/мм²

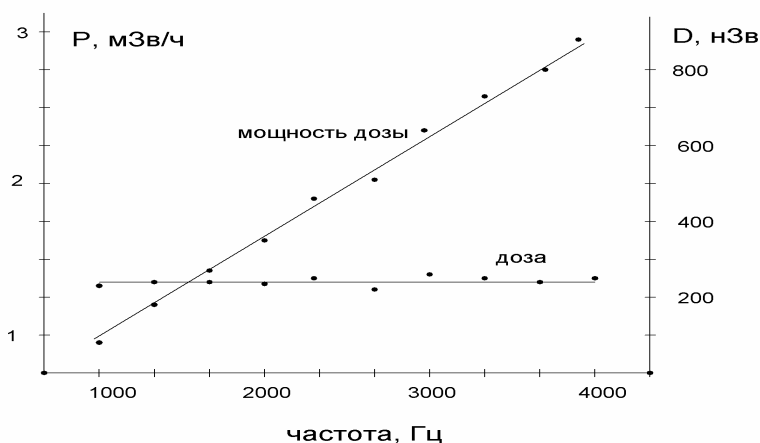


Рис.5. Зависимость мощности дозы излучения за 800 импульсов и дозы за импульс от частоты следования импульсов трубки РИА1-120-3

Данные по изменению массы анода в результате эрозии, позволяют оценить ресурс ИРТ РИА1-120-3 величиной не менее $1 \cdot 10^6$ импульсов.

В четвертом разделе главы по результатам проведенной работы сделаны выводы:

1. разработана конструкция металлокерамического катода, позволяющая получать стабильную взрывную эмиссию электронов из нескольких центров одновременно, расположенных по окружности катода, при скорости нарастания импульса напряжения на уровне 10^{13} В/с;
2. показано, что снижение удельной импульсной мощности электронного пучка, бомбардирующего вольфрамовый анод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, снижает эрозию анода за счет увеличения скорости охлаждения поверхности анода, позволяя повысить максимальную тепловую нагрузку ИРТ путем увеличения частоты следования импульсов, при сохранении размеров эффективного фокусного пятна;
3. создана отпаянная наносекундная импульсная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка для медицинских приложений РИА1-120-3 на напряжение 120 кВ, обладающая эффективным фокусным пятном диаметром 1,5 мм, с допустимой средней мощностью 1600 Вт и ресурсом работы не менее $1 \cdot 10^6$ импульсов, при типовых условиях эксплуатации медицинских диагностических аппаратов.

В четвертой главе рассмотрены наносекундные высоковольтные генераторы для дефектоскопии, созданные по схеме многозвенного магнитного генератора импульсов с использованием последнего звена в качестве промежуточного ИНЭ с ППТ. Описана система цифровой визуализации рентгеновского излучения.

В первом разделе приводится описание первого в мире переносного импульсного дефектоскопа с полностью твердотельной системой коммутации и отпаянной ИРТ на напряжение 345 кВ. Отличительной особенностью схемы данного аппарата является введение в последнее звено сжатия магнитного генератора, также выполняющего функцию промежуточного ИНЭ, дополнительной индуктивности, рис. 6.

В третьем разделе главы по результатам проведенной работы сделаны следующие выводы:

1. разработана отпаянная наносекундная импульсная рентгеновская трубка РИА2-400 для дефектоскопии на напряжение 210 - 350 кВ, с размером рентгеновского фокуса 2,3 мм;
2. создан переносной рентгеновский дефектоскоп РУП-300-Ш на напряжение 325 кВ для использования в нестационарных условиях, с просвечивающей способностью до 40 мм стали и общей массой оборудования 35 кг. Дефектоскоп работает как в режиме пленочной, так и цифровой регистрации;
3. создан малогабаритный наносекундный рентгеновский дефектоскоп «ПИРАТ» моноблочного исполнения, весом 9 кг с просвечивающей способностью до 30 мм стали. Амплитуда выходных импульсов напряжения - 210 кВ, эффективная энергия квантов - 140 кэВ, частота следования импульсов 80 – 280 Гц, питание от однофазной сети переменного тока напряжением 220В;
4. создана система цифровой регистрации рентгеновского излучения от ГВИ наносекундной длительности на основе рентгенолюминесцентного усиливающего экрана и ПЗС-камеры.

Пятая глава посвящена созданию палатных медицинских рентгенодиагностических аппаратов на основе высокочастотных наносекундных высоковольтных генераторов импульсов рентгеновского излучения, созданных по схеме многозвенного магнитного генератора импульсов с использованием последнего звена в качестве промежуточного ИНЭ с ППТ и отпаянной взрывоэмиссионной ИРТ.

В первом разделе приведены результаты измерения временных характеристик и интенсивности свечения усиливающих рентгенолюминесцентных экранов, применяемых в медицинской диагностике. Продемонстрированы преимущества использования наносекундных импульсов рентгеновского излучения, приводящие к уменьшению

дозовой нагрузки на пациента в несколько раз за счет большой длительности послесвечения усиливающего экрана, многократно превышающей длительность импульса излучения, рис. 8.

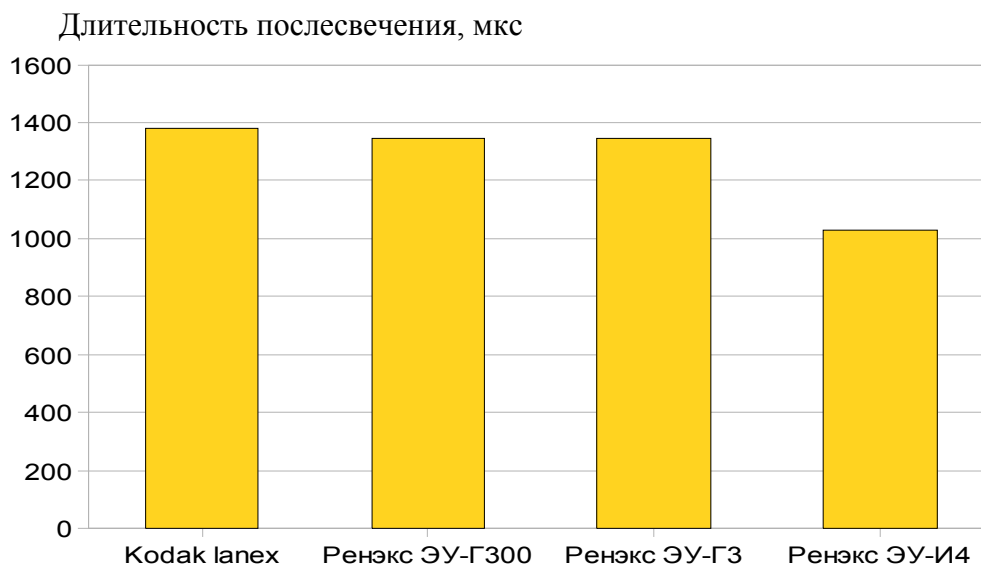


Рис. 8. Длительность послесвечения усиливающих экранов по уровню 0,1

Во втором разделе рассмотрена конструкция и принцип работы импульсного палатного аппарата «АРДП-01» напряжением 110 кВ, средней мощностью 700 Вт и массой 39 кг, внешний вид которого приведен на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид аппаратов АРДП-01(слева) и «Ясень-01» (справа)

Показано, что многозвенный магнитный генератор импульсов с использованием последнего звена в качестве промежуточного ИНЭ, можно разделить на блоки, выделив в отдельную сборку последнее звено магнитного сжатия с ППТ и ИРТ, и соединить блоки высоковольтным кабелем, который вводится в цепь предпоследнего звена сжатия.

Приведены результаты сравнительных дозиметрических испытаний импульсного аппарата АРДП-01 и диагностического рентгеновского аппарата с трубкой постоянного тока РУМ-20, экспериментально подтвердившие, что использование наносекундных импульсов рентгеновского излучения ведет к уменьшению дозовой нагрузки на пациента в несколько раз, рис. 10.

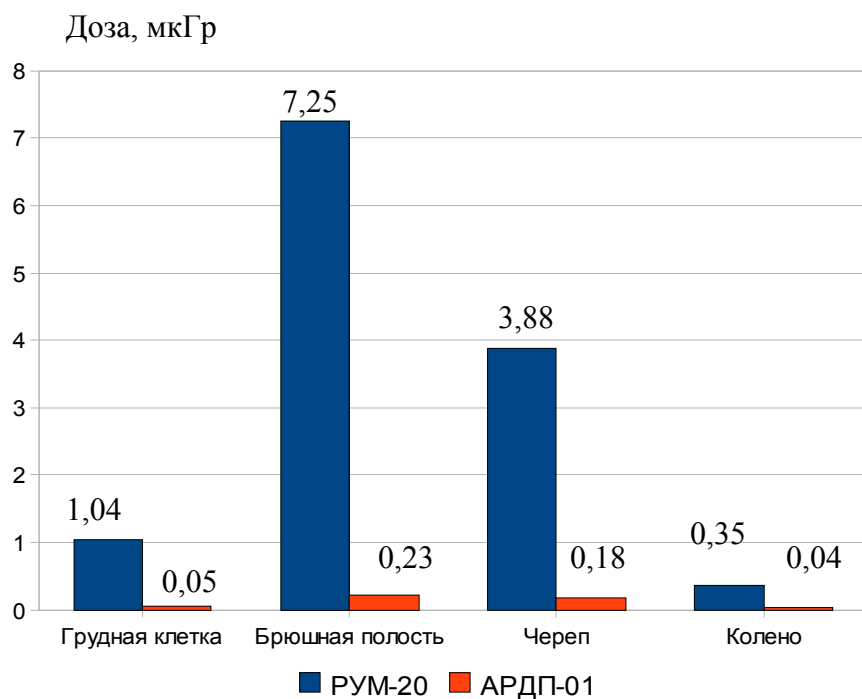


Рис. 10. Сравнение доз облучения пациентов при рентгеновской диагностике на аппаратах РУМ-20 и АРДП-01

В третьем разделе главы представлен импульсный палатный аппарат «Ясень-01» с регулируемым выходным напряжением до 110 кВ и мощностью 1500 Вт. Внешний вид аппарата представлен на рис. 9. Показана возможность введения регулировки выходного напряжения наносекундных ГВИ, созданных по схеме многозвенного магнитного генератора импульсов с использованием последнего звена в качестве промежуточного

ИНЭ с ППТ. Исследованы выходные характеристики отпаянной трубки РИА1-120 при напряжениях менее 110 кВ и скорости нарастания напряжения менее $5 \cdot 10^{12}$ В/с, рис. 11 и рис. 12.

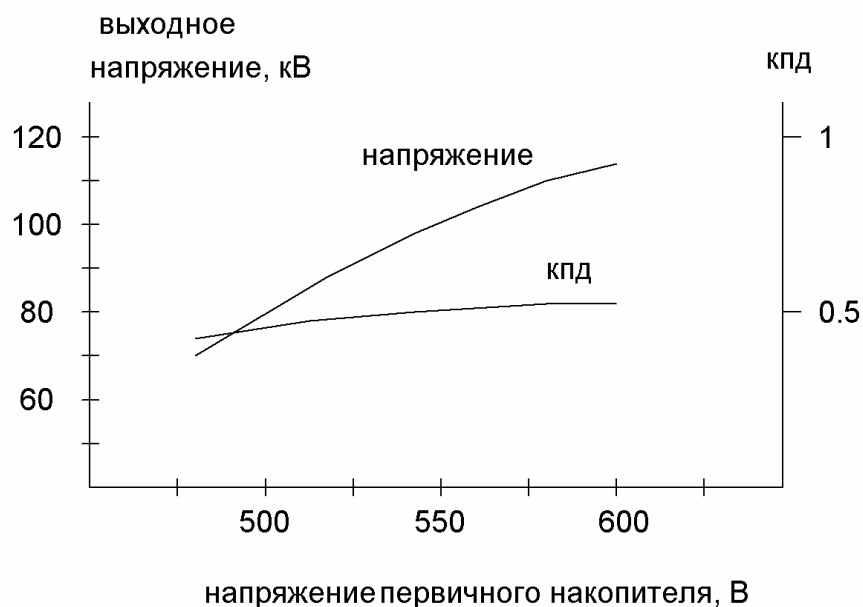


Рис. 11. Результаты экспериментов по регулировке выходного напряжения в зависимости от напряжения первичного накопителя

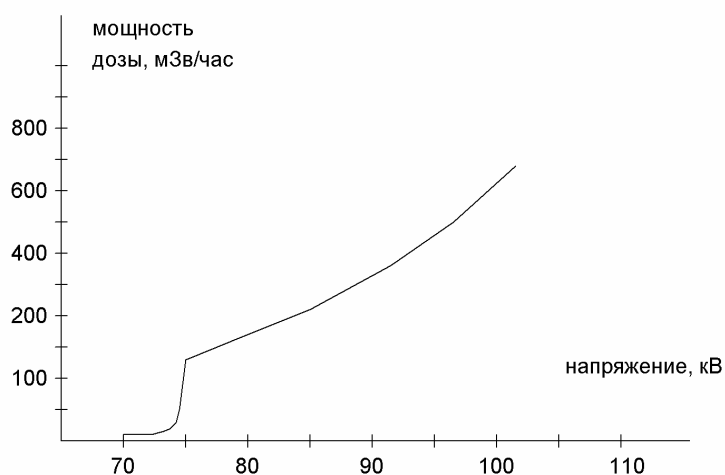


Рис. 12. Мощность дозы рентгеновского излучения, генерируемого трубкой РИА1-120, в зависимости от напряжения, приложенного к трубке

В четвертом разделе главы приведены выводы:

1. в результате исследования, направленного на оптимизацию схем генераторов, состоящих из тиристорного преобразователя и магнитного генератора (2 – 3 звена сжатия) с ППТ в оконечном каскаде, для питания наносекундных ИРТ, уменьшены габариты, вес, увеличена надежность рентгеновских аппаратов;
2. решена задача разделения высоковольтного наносекундного генератора рентгеновского излучения с твердотельной системой коммутации на два блока, что позволяет уменьшить вес высоковольтного блока излучения, выделив последнее звено сжатия магнитного генератора импульсов с рентгеновской трубкой в отдельную сборку;
3. экспериментально показано, что при использовании в медицине высокочастотных наносекундных рентгенодиагностических аппаратов и стандартных фотографических приемников излучения, поглощенная доза снижается в 9 – 30 раз, по сравнению с аппаратами, использующими рентгеновскую трубку постоянного тока;
4. разработана и внедрена в медицинскую практику серия импульсных наносекундных высокочастотных рентгеновских палатных аппаратов «Ясень-01» с регулировкой высокого напряжения до 110 кВ, с максимально допустимой кратковременной мощностью 1500 Вт, с полностью твердотельной системой коммутации и частотой следования импульсов до 4 кГц.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате проведенных исследований электрогидравлического метода разрушения частиц твердых материалов ударными волнами, образующимися при электрическом разряде в пультре с помощью импульсов высокого напряжения показано, что импульсы с длительностью фронта и спада менее 10 нс разрушают

частицы твердого материала с размерами от единиц до сотен микрометров. Найдены оптимальные условия обработки материала с точки зрения уменьшения энергозатрат.

2. Показано, что для повышения эффективности раскрытия тонких включений область обработки пульпы следует ограничить электроизоляционной разрядной ячейкой, с двумя электродами. Расстояние между электродами выбирается из условия пробоя пульпы, а диаметр ячейки выбран равным расстоянию между электродами. Оптимальное значение удельной энергии, с точки зрения энергетических затрат, лежит в диапазоне $3 - 10 \text{ Дж/см}^3$.
3. Создана опытная высоковольтная импульсная установка обработки непрерывного потока пульпы «Пирит-2» для селективного раскрытия тонких включений из твердого материала, с размерами частичек материала от единиц до сотен микрометров, с амплитудой импульсов высокого напряжения – 150 кВ на нагрузке 95 Ом, длительностью импульса 5 нс и частотой следования импульсов до 1 кГц.
4. При обработке хвостов обогащения сульфидных руд, с размерами частиц менее 100 мкм и исходным содержанием упорного золота до 2,2 г/т, происходит селективное раскрытие тонких включений, с повышением извлекаемости Au на 70%. При этом, за счет увеличения активности растворения сульфидов в воде, вызванного образованием новых поверхностей и озонированием воды электрическими разрядами, вода пульпы содержит до 0,8 г/л цинка и до 2 г/л железа. По меди полученный раствор в 16 раз превышает минимальное содержание, пригодное для промышленной добычи (0,05 г/л). Таким образом, раствор является обогащенной жидкой рудой. Производительность установки - 90 кг/час.
5. Разработана конструкция металлокерамического катода, позволяющая получить стабильную взрывную эмиссию электронов одновременно из нескольких центров,

расположенных по окружности катода, при скорости нарастания импульса напряжения менее 10^{13} В/с.

6. Показано, что снижение удельной импульсной мощности электронного пучка (энергии импульса), бомбардирующего вольфрамовый анод импульсной взрывоэмиссионной рентгеновской трубки, снижает эрозию анода за счет увеличения скорости охлаждения поверхности анода, позволяя повысить максимальную тепловую нагрузку ИРТ путем увеличения частоты следования импульсов, при сохранении размеров эффективного фокусного пятна.
7. Разработаны и серийно выпускаются наносекундные импульсные рентгеновские трубки для дефектоскопии и медицинской диагностики РИА1-120-3 на напряжение 120 кВ и РИА2-400 на напряжение 350 кВ, работающие при частоте следования импульсов до 4 кГц и скорости нарастания импульса напряжения от $3 \cdot 10^{12}$ В/с, что более чем на порядок ниже скорости нарастания напряжения, требуемой для трубок серии ИМА. Для рентгеновской трубки РИА1-120-3 с эффективным фокусным пятном диаметром 1,5 мм, получена средняя мощность в электронном пучке до 1600 Вт, что в 4-5 раз выше известных аналогов.
8. Разработаны и внедрены в производственное применение мощные компактные импульсные рентгеновские дефектоскопы РУП-300-Ш и «ПИРАТ» с полностью твердотельной системой коммутации напряжением 325 кВ и 210 кВ, максимальной частотой следования импульсов 300 Гц и 280 Гц, максимально допустимой кратковременной мощностью 900 Вт и 180 Вт, весом 25 кг и 9 кг соответственно, что в 2 – 3 раза выше по удельной мощности, чем у лучших аналогов.
9. Разработаны и серийно выпускаются медицинские импульсные наносекундные рентгенодиагностические палатные аппараты «Ясень-01» напряжением 110 кВ с полностью твердотельной системой коммутации, максимально допустимой кратковременной мощностью 1500 Вт, с частотой следования импульсов до 4 кГц и

весом 45 кг, что в 1,5-2 раза легче лучших зарубежных аналогов. При создании аппаратов решена задача разделения высоковольтного наносекундного генератора на блоки, что позволило уменьшить вес блока излучения ИРА. Соединение между блоками осуществлено гибким высоковольтным кабелем длиной до 5 м. Экспериментально показано, что при использовании наносекундных диагностических аппаратов и стандартных фотографических приемников излучения, поглощенная доза снижается в 9 – 30 раз, по сравнению с аппаратами, использующими рентгеновскую трубку постоянного тока.

Список работ опубликованных по теме диссертации

1. Compact repetitive electron-beam and X-radiation generator. Part 1: a desktop generator [Text] / Kotov Yu. A., Mesyats G.A., Korzhenevski S.R, Motovilov V.A., Rukin S.N., Skotnikov V.A., Filatov A.L. // In Proc. of 10-th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM USA, 1995. vol. 2. pp. 1231-1234.
2. Compact repetitive generators for medical X-ray diagnostics [Text] / Filatov A.L., Korzhenevski S.R, Kotov Yu.A, Mesyats G.A., Motovilov V.A., Skotnikov V.A. // In Proc. of 11-th Int. Conf. On High Power Particle Beams, Prague, Czech Republic, 1996. pp. 909-912.
3. Filatov A.L. «Control» diagnostic x-ray apparatus with a digital image visualization system [Text] / Filatov A.L., Korzhenevski S.R., Scherbinin S.V. // In Proc. of 12-th International Conference on High-Power Particle Beams. Haifa, Israel, 1998. pp. 495-498.
4. Использование сильноточного электронного пучка для генерации озона [Текст] / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, А.Л. Филатов, С.Р. Корженевский // Химия высоких энергий. – 1996. - Т. 30. - № 5. - С. 386-387.

5. Compact repetitive electron-beam and X-radiation generator. Part 2: A hand-carried X-ray apparatus [Text] / Kotov Yu. A., Mesyats G.A., Korzhenevski S.R., Motovilov V.A., Rukin S.N., Skotnikov V.A., Filatov A.L. // In Proc. of 10-th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM USA, 1995. vol. 2. pp. 1235-1238.
6. A medical X-ray diagnostic complex based on a compact nanosecond generator [Text] / Filatov A.L., Kotov Yu. A., Korzhenevski S. R., Mesyats G.A., Motovilov V.A., Skotnikov V.A., Scherbinin S.V. // In Proc. of 11-th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, MD USA, 1997. vol. 2. pp. 1100-1102.
7. Application of nanosecond X-radiation generators in X-ray examination [Text] / Filatov A.L., Kotov Yu. A., Korzhenevski S.R., Scherbinin S.V. // In Proc. of 11-th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, MD USA, 1997, vol. 2, pp. 1097-1099.
8. Рентгеновский импульсный дефектоскоп с цифровой системой визуализации изображения [Текст] / С.Р. Корженевский, С.В. Щербинин, В.А. Мотовилов, А.Л. Филатов // Дефектоскопия. – 1999. - № 12. - С. 51-56.
9. Пат. 2153848 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 В 6/00, Н 05 G 1/20. Способ получения рентгеновского изображения и диагностический аппарат / Месяц Г.А., Котов Ю.А., Филатов А.Л., Мотовилов В.А., Скотников В.А., Корженевский С.Р., Щербинин С.В.; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН. - № 97114413/14; заявл. 11.08.1997; опубл. 10.08.2000, Бюл. № 22. – 5 с.
10. Nanosecond-discharge-assisted selective separation of fine inclusions not involved in the impurity lattice [Text] / Filatov A.L., Kotov Yu.A, Korzhenevski S.R. Jakovlev V.L., Korykin B.M., Boriskov F.F. // In Proc. of 11-th IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, MD USA, 1997, v. 2, pp. 1103 - 1105.
11. Комплексная переработка пиритовых отходов ГОКов наносекундными импульсными воздействиями [Текст] / Ю.А Котов, Г.А Месяц, А.Л. Филатов, Б.М.

Корюкин, Ф.Ф. Борисков, С.Р. Корженевский, В.А. Мотовилов, С.В. Щербинин // ДАН. – 2000. – Т. 372. - № 5. - С. 654-656.

12. Комплексная переработка золотосодержащих пиритовых отходов Учалинской обогатительной фабрики [Текст] / Ю.А. Котов, А.Л. Филатов, С.Р. Корженевский, В.А. Мотовилов, Ф.Ф. Борисков, Л.О. Макаранец, Н.А. Филиппова, Н.И. Житников // Межрегиональная научно-техническая конференция «Проблемы геологии и разведки месторождений золота, извлечения благородных металлов из руд и отходов производства», 17-19 ноября 1999 г., г. Екатеринбург : материалы конференции. - Екатеринбург, 1999.
13. Пат. 2150326 Российская Федерация, МПК⁷ В 02 С 19/18. Способ и установка для селективного раскрытия тонких включений из твердого материала / Котов Ю.А., Корженевский С.Р., Мотовилов В.А., Филатов А.Л., Корюкин Б.М., Борисков Ф.Ф.; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН. - № 98117879/03; заявл. 29.09.1998 ; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. – 7 с.
14. Пат. 2174726 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 J 35/00, Н 05 G 1/02. Острофокусная двухэлектродная импульсная рентгеновская трубка / Филатов А.Л., Корженевский С.Р., Щербинин С.Р., Боракова М.Г., Голубев В.А.; заявитель и патентообладатель Институт электрофизики Уральского отделения РАН, комбинат «Электрохимприбор». - № 2000122229/09; заявл. 22.08.2000; опубл. 10.10.2001, Бюл. № 28. – 6 с.
15. The nanosecond PP X-ray apparatus [Text] / Filatov A.L., Korzhenevski S.R., Kuznetsov V.L., Ananin M.V., Motovilov V.A. // In Proc. of 15-th International Conference on High-Power Particle Beams. Saint-Petersburg, Russia, 2004. pp. 552-554.
16. Ананьин М.В. Импульсный рентгеновский аппарат [Текст] / М.В. Ананьин, С.Р. Корженевский, А.Л. Филатов // 10 Всероссийская научная конференция студентов-

физиков и молодых ученых, 1-7 апреля 2004 г., г. Москва : тезисы докладов. – Москва, 2004. - С. 715.

17. Пат. 52321 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 В 6/00. Универсальный мобильный рентгеновский аппарат / Филатов А.Л., Бастриков В.Л., Корженевский С.Р., Кузнецов В.Л., Поникаровских А.Э.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «ДАТА-ЦЕНТР Икс-Рэй», Филатов А.Л., Бастриков В.Л., Корженевский С.Р., Кузнецов В.Л., Поникаровских А.Э. - № 2005133676/22; заявл. 31.10.2005 ; опубл. 27.03.2006, Бюл. № 9. – 2 с.
18. Пат. 64153 Российская Федерация, МПКО⁸ 24-01. Универсальный мобильный рентгеновский аппарат / Филатов А.Л., Бастриков В.Л., Корженевский С.Р., Кузнецов В.Л., Поникаровских А.Э.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «ДАТА-ЦЕНТР Икс-Рэй», Филатов А.Л., Бастриков В.Л., Корженевский С.Р., Кузнецов В.Л., Поникаровских А.Э. - № 2005503167; заявл. 31.10.2005; опубл. 16.09.2007. – 2 с.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность д.т.н. А.Л. Филатову за инициирование работы, многолетнее научное руководство, полезные советы и плодотворное обсуждение результатов работы, д.т.н. В.Л. Кузнецову за постоянный интерес к работе и всестороннюю помощь, чл.-корр. РАН Ю.А. Котову, д.т.н. С.Ю. Соковнину, к.т.н. Ф.Ф. Борискову, сотрудникам лаборатории импульсных источников излучений Института электрофизики УрО РАН к.т.н. С.В. Щербинину, В.А. Мотовилову, Л.А. Парамонову, Д.С. Скоморохову за многолетнее сотрудничество, помощь в проведении работы и моральную поддержку.