Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Рачков Роман Сергеевич

ЭКРАНИРОВАННЫЕ ПРОЧНЫМ КОРПУСОМ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ И БЛОКИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГАММА – КАРОТАЖА

Специальность 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Автор:

Москва, 2020

Работа выполнена во ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова».

Научный руководитель:

Юрков Дмитрий Игоревич
кандидат технических наук
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», заместитель директора – первый заместитель главного конструктора – руководитель научно-производственного центра импульсной техники

Официальные оппоненты:

Сапожников Михаил Григорьевич
доктор физико-математических наук
Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, главный научный сотрудник

Морев Сергей Павлович
доктор физико-математических наук
Акционерное общество «НПП «Торий», главный научный сотрудник

Стенин Владимир Петрович
кандидат технических наук
Акционерное общество «РусВэллГруп», заместитель генерального директора по научно-технической деятельности и геологии

Защита состоится 09 июня 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://ds.mephi.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МИФИ.01.05, к.т.н. М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В перспективных планах нефтегазовой отрасли в последнее время всё больше внимания уделяется «старым» нефтяным скважинам, в недрах которых находится ещё достаточно запасов углеводородов. С целью добычи этих запасов применяют такие технологии как бурение боковых стволов и «хвостовиков», представляющих собой ответвления скважин малого диаметра от основной скважины. Такая технология потребовала создания новой каротажной аппаратуры спектрометрического импульсного нейтронного гамма каротажа (ИНГКС) с уменьшенным диаметром скважинного прибора, предназначенной для работы в условиях обсаженных стальной трубой скважин боковых стволов и «хвостовиков». Примером такой аппаратуры является аппаратура АИНК-73С-2, состоящая из импульсного генератора нейтронов на газонаполненной нейтронной трубке, детекторов гамма-излучения, защитных экранов, электронных блоков и прочного корпуса. Прочный корпус предназначен для защиты скважинного прибора от механического воздействия, внешнего давления и представляет собой высокопрочную трубу, имеющую с обеих сторон резьбовое соединение для герметизации электроники от внешнего флюида. При этом существует ряд факторов, связанных с конструкцией прочного корпуса, которые могут негативно сказываться на характеристиках данной аппаратуры.

Во-первых, боковые стволы имеют, как правило, малый внутренний диаметр обсадной колонны (от 89 мм), в связи с чем, внешний диаметр корпуса жестко ограничен. Задача осложняется и тем, что для защиты детекторов гамма-излучения от фонового излучения, возникающего при взаимодействии тепловых нейтронов с самим корпусом, необходимо обеспечить радиационную защиту детекторов излучения от этих нейтронов. Это достигается с помощью нанесения специальных покрытий напротив детекторной части. Для достижения высокой эффективности радиационной защиты материалы защиты должны обладать высокой способностью поглощения тепловых нейтронов.

Помимо радиационных свойств защитное покрытие должно обладать стойкостью к истиранию и ударам об обсадную колонну либо защищено другим способом. В имеющейся литературе, включая зарубежные публикации, отсутствует информация о путях и способах решения данной проблемы.

Во-вторых, магнитное поле обсадной колонны скважины неоднородно по длине ствола и имеет аномально намагниченные участки с уровнем магнитных полей в 100-200Э. В конструкции аппаратуры ИНГКС имеется нейтронный генератор, в состав которого входит нейтронная трубка с источником ионов типа Пеннинга. Такой источник включает в себя магниты, обеспечивающие работу ионного источника и самой нейтронной трубки. При воздействии внешнего магнитного поля обсадной колонны происходит изменение конфигурации магнитных полей ионного источника, что может привести к сбою в работе нейтронного генератора. Помимо нейтронной трубки влияние магнитного поля обсадной колонны также отрицательно сказывается на работе ФЭУ, имеющегося в аппаратуре ИНГКС. Одним из возможных способов предотвращения подобных сбоев является использование в качестве магнитного экрана прочного корпуса, выполненного из магнитной стали. Однако, эффективность экранирования нейтронной трубки и ФЭУ таким способом не исследовалась.

В-третьих, внутренний диаметр корпуса определяется диаметрами детекторов, которые для повышения эффективности регистрации ответного гамма излучения должны быть максимальны. Вторым элементом, лимитирующим внутренний диаметр, является нейтронный генератор. Таким образом, толщина стенки корпуса жестко ограничена. В условиях малых толщин стенок и при воздействии внешних факторов, таких как температура и давление, корпус должен обладать достаточным запасом прочности. Необходимо учесть, что на его устойчивость оказывают существенное влияние такие основные факторы как несоосность, наличие проточек, глухих отверстий и т.д. Для этого необходим более точный расчет прочности, что позволит избежать пластической деформации и смятия корпуса в процессе эксплуатации

аппаратуры. Учет перечисленных факторов для такого рода случаев в имеющейся литературе отсутствует.

Перечисленные выше факторы свидетельствуют о необходимости в комплексном исследовании физических процессов, связанных с прочным корпусом каротажной аппаратуры ИНГКС, учитывающем такие его свойства как: магнетизм, прочность и наличие радиационной защиты. Для реализации этого подхода, следует разработать технологию нанесения нейтронопоглощающего покрытия, метод расчета корпусов, учитывающий такие факторы как несоосность, наличие проточек, глухих отверстий и т.д., а также исследовать целесообразность и необходимость экранировки нейтронной трубки и ФЭУ с помощью магнитного корпуса. Решение таких задач в каротажной аппаратуре ИНГКС позволит существенно улучшить её характеристики, что подтверждает актуальность работы автора.

Цель работы заключается в научном обосновании, исследовании и разработке конструкторско-технологических решений (способов), которые позволяют с помощью экранирования газоразрядных ионных источников и блоков детектирования прочным корпусом, расширить область применения каротажной аппаратуры ИНГКС, обеспечив работоспособность в условиях обсаженных скважин уменьшенного диаметра (от 89 мм).

Для достижения поставленных целей необходимо решить **следующие задачи**:

- исследовать эффективность экранирования нейтронной трубки от внешних магнитных полей с помощью корпуса из магнитной стали;

- исследовать и сравнить способы радиационной защиты детекторов гамма-излучения для каротажной аппаратуры ИНГКС, обосновать выбор способа защиты;

- определить и обосновать расчетные зависимости для вычисления механических напряжений, которые возникают в корпусе, находящемся под действием внешнего гидростатического давления до 120 МПа с учетом следующих факторов: наличие проточки на внешней стороне корпуса, наличие

несоосности (разнотолщинности), наличие напряжений, вызванных разницей температуры между внутренней и внешней стенкой прочного корпуса, наличие глухих отверстий.

Научная новизна

1. Впервые исследована возможность и предложен способ эффективной экранировки нейтронной трубки аппаратуры ИНГКС от внешнего магнитного поля со стороны обсадной колонны скважины с помощью корпуса из магнитной стали. Показано, что такой способ экранировки обеспечивает защиту от магнитных полей до 1200Э.

2. Впервые с целью снижения уровня гамма-фона на детекторах для аппаратуры ИНГКС предложена радиационная защита детекторов, обладающая одновременно эффективными свойствами по поглощению тепловых нейтронов и стойкостью к механическим воздействиям (ударам и истиранию). При этом показано, что толщина поглощающего слоя защиты в 1 мм достаточна для уменьшения потока тепловых нейтронов на два порядка.

3. Впервые предложен новый способ нанесения радиационной защиты для аппаратуры ИНГКС, заключающийся в нанесении материала в специальную проточку, выполненную снаружи корпуса, закрытого оболочкой в виде тонкостенной трубы, что обеспечивает свойства радиационной защиты и стойкость к механическим воздействиям.

4. Впервые проведено всестороннее исследование свойств прочного корпуса, учитывающее влияние его магнитных свойств, проточек, несоосностей, несквозных отверстий и радиационной защиты, на характеристики каротажной аппаратуры ИНГКС, предназначенной для эксплуатации в условиях скважин уменьшенного диаметра.

Практическая значимость

1. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых демонстрируют эффективность экранировки нейтронной трубки от внешнего магнитного поля со стороны обсадной колонны скважины с

помощью прочного корпуса из магнитной стали. Такой способ экранировки обеспечивает защиту от магнитных полей до 1200 Э.

2. Предложено конструкторско-технологическое решение по созданию защитного слоя, заключающиеся в нанесении смеси борного порошка со связующим компонентом на наружную поверхность прочного корпуса. Для защиты и обеспечения механической стойкости покрытие снаружи герметично закрыто оболочкой в виде тонкостенной трубы. Предложенное решение и технология были практически реализованы в корпусах аппаратуры импульсного нейтронного спектрометрического каротажа АИНК-73С-2, АИНК-89С-2, АИНК-ПЛ150.

3. На основе расчетов проведен анализ механических напряжений прочного корпуса, возникающих от воздействия температуры внутри скважины. Показано, что данными напряжениями можно пренебречь, поскольку их значения существенно меньше напряжений от внешнего давления.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ эффективной экранировки нейтронной трубки от внешнего магнитного поля со стороны обсадной колонны скважины с помощью прочного корпуса из магнитной стали, обеспечивающий защиту от магнитных полей до 1200Э [Патент №186408].

2. Способ для электро-магнитной защиты блока детекторов аппаратуры ИНГКС, обеспечивающий эффективную экранировку ФЭУ от внешнего магнитного поля до 200 Э с помощью корпуса сцинтиблока толщиной 2,2 мм, в котором расположены сцинтилляционный кристалл и ФЭУ. Корпус изготовлен из электротехнической стали, с внутренний стороны которого установлен дополнительный экран толщиной 0,5 мм из ленты 79НМ [Патент №186408].

3. Способ для радиационной защиты корпуса от тепловых нейтронов с целью снижения уровня гамма-фона на детекторах, заключающийся в нанесении материала, поглощающего тепловые нейтроны, в специальную

проточку, выполненную снаружи корпуса, закрытого оболочкой в виде тонкостенной трубы, что обеспечивает одновременно свойства радиационной защиты и стойкость к механическим воздействиям (истиранию, ударам и т.д.) [Патент №168744].

4. Результаты расчётов, положенные в основу конструкции прочных корпусов каротажной аппаратуры ИНГКС, предназначенной для эксплуатации в скважинах уменьшенного диаметра, учитывающие влияние проточек, несоосностей (в 0,5, 1,0 и 1,5 мм) и несквозных отверстий (глубиной до 3 мм) в корпусе.

5. Результаты исследований влияния внешних магнитных полей на работоспособность нейтронной трубки и ФЭУ каротажной аппаратуры ИНГКС.

Авторский вклад

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены лично автором и непосредственно при его участии. Автор лично принимал участие в разработке аппаратуры импульсного нейтронного гамма-спектрометрического каротажа АИНК-73С-2, АИНК-89С-2, в которых реализованы все конструкторско-технологические решения, выносимые на защиту. Разработанные решения автором были также реализованы в комплексах: система многопараметрического исследования скважин в процессе бурения СМИС-172-Б, автономная система исследования скважин на бурильных трубах СМИС-102-А, аппаратура импульсного нейтронного гамма-спектрометрического каротажа скважин с повышенной температурой АИНК-ПЛ-150.

Апробация работы

Результаты проведенных по теме диссертации исследований докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: VI международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения», XXIX международная конференция «Машиноведение и инновации МИКМУС-2017», научно-техническая конференция «ВНИИА-2016», научно-техническая конференция

«ВНИИА-2017», научно-техническая конференция «ВНИИА-2018», V международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ – 2019.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ из них 2 статьи в журнале, входящем в международную реферируемую базу SCOPUS, 3 статьи в журналах, реферируемых ВАК, 2 патента, 6 статей в сборниках трудов научных конференций.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 135 страницах, содержит 74 рисунка, 7 таблиц. Библиография включает 98 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и поставлены решаемые задачи, определена научная новизна и практическая ценность работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены факторы, влияющие на технические и эксплуатационные характеристики аппаратуры ИНГКС малого диаметра (от 73 мм), которые связаны с прочным корпусом.

В диссертации автором дана краткая характеристика геофизическим методам импульсного нейтронного каротажа, среди которых, наиболее информативным является метод спектрометрического импульсного нейтронного гамма-каротажа (ИНГКС). Принцип работы этого метода заключается в раздельной регистрации энергетических спектров гамма-излучения, возникающих от неупругого рассеяния быстрых нейтронов (ГИНР) и радиационного захвата (ГИРЗ) тепловых нейтронов. Энергетические спектры ГИНР и ГИРЗ являются индивидуальными характеристиками атомных ядер.

Анализ спектров ИНГКС при наличии соответствующего интерпретационного математического программного обеспечения позволяет определить относительные содержания в породе семи основных элементов (O, Si, Fe, Ca, Mg, H, C), составляющих матрицу горных пород, и четырех элементов (O, H, C, Cl), образующих флюид порового пространства. Тем самым, с помощью метода ИНГКС можно определить характер нефтенасыщенности и литологический состав горных пород.

В процессе эксплуатации аппаратуры ИНГКС было обнаружено, что магнитные поля, присутствующие в скважине, уровня в 100-200Э влияют на магниты ионного источника газонаполненной нейтронной трубки. Вследствие чего может произойти сбой работы нейтронного генератора, вызванный изменениями конфигурации магнитных полей, связанных с реакцией магнитов трубки на внешнее магнитное поле в обсадной колонне. Магнитные поля скважины также негативно влияют на ФЭУ, находящийся в регистрационной части аппаратуры (блок детекторов). В связи с чем, необходимо уменьшить данное влияние с помощью системы защиты аппаратуры, встроенной в её конструкцию. В качестве одного из возможных способов такой защиты можно использовать прочный корпус аппаратуры, выполненный из магнитной стали. Однако, эксперименты и расчеты для такого способа экранировки не проводились, что представляет собой важную научно-техническую задачу и требует исследования.

Другой важной задачей является обеспечение радиационной защитой детекторов гамма-излучения. Потребность в такой защите обусловлена тем, что в результате взаимодействия тепловых нейтронов с материалами конструкции блока детекторов образуется гамма-излучение, которое является дополнительным радиационным фоном и его следует вычитать из регистрируемого спектра. Создание радиационной защиты позволит зарегистрировать амплитудно-временные спектры с большим разрешением, что повысит точность аппаратуры. Таким образом, решение проблемы радиационной защиты представляет актуальную научно-техническую задачу.

Одно из возможных конструкторско-технологических решений данной задачи заключается в нанесении нейтронопоглощающего покрытия в специальную проточку в корпусе, для чего требуется разработка соответствующей технологии.

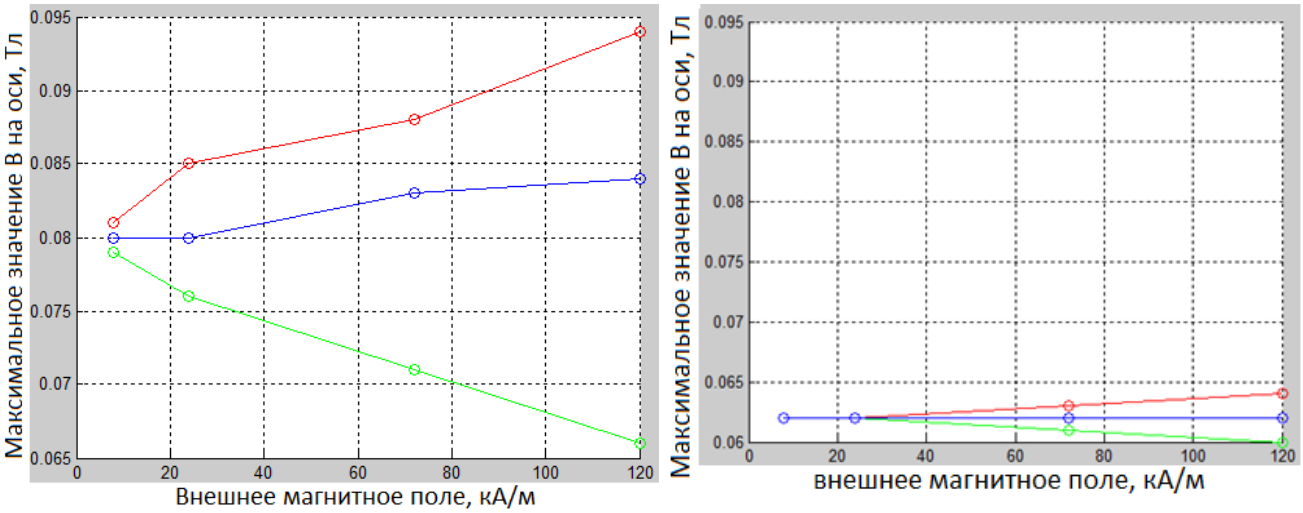
Для обеспечения лучших характеристик, таких как поток нейтронов, ресурс нейтронного генератора, спектральное разрешение при регистрации спектров ГИНР и ГИРЗ целесообразно максимально увеличить диаметр нейтронного генератора и сцинтилляционных детекторов, поскольку их размеры влияют на качество регистрируемых спектров. В то же время, прочный корпус ограничен проходным размером скважинного прибора в обсадной трубе. Таким образом, толщина стенки корпуса жестко лимитирована. В этом случае для расчета прочности корпуса необходим учет влияния таких основных факторов как несоосность, проточки, несквозные отверстия и т.д., что позволит избежать пластической деформации корпуса в процессе эксплуатации аппаратуры. Ранее подобное исследование не проводилось.

Таким образом, рассмотрев особенности и характеристики аппаратуры ИНГКС, предназначенной для работы в обсаженных скважинах малого диаметра, были сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена исследованию работоспособности составных частей аппаратуры ИНГКС – нейтронной трубки (ионного источника) и ФЭУ в условиях действия внешнего магнитного поля скважины и защиту от него с помощью прочного корпуса прибора из магнитной стали.

Результаты моделирования (рис. 1), проведенного для нейтронной трубки и ФЭУ для двух типов корпусов: магнитного и немагнитного показали, что прочный корпус, изготовленный из немагнитной стали не способен обеспечить эффективную экранировку от внешних магнитных полей, как продольных, так и поперечных. В тоже время прочный корпус, имеющий магнитную проницаемость $\mu \approx 100$, обеспечивает эффективную защиту магнитной системы нейтронной трубки и ФЭУ.

Магнитное поле скважины, действуя на магнитную систему трубки, оказывает влияние на токовые характеристики разряда ионного источника, что в свою очередь приводит к изменению давления рабочего газа в источнике ионов. Это связано с тем, что на изменение значения тока разряда источника ионов, система управления генератором по обратной связи реагирует изменением напряжения на натекателе рабочего газа, чтобы изменить ток разряда в стабильный режим. В связи с чем, необходимо изучить влияние давления газа на режимы горения источника ионов.



а) б)

Рис. 1. Расчетные зависимости изменения индукции на оси системы от магнитного поля: а) - для немагнитного корпуса, б) – для магнитного корпуса. Красная линия - магнитные поля сонаправленны, зеленая – противоположнонаправлены, синяя –перпендикулярны

Анализ результатов экспериментов по исследованию режимов горения разряда в источнике ионов нейтронной трубки при различном давлении показывает, что в зависимости от давления газа в трубке изменяется вид зависимостей тока разряда от напряжения (рис. 2). Область стабильного горения разряда соответствуют давлению 0,4 – 0,8 Па (3 – 6 мТорр). Длительность задержки зажигания разряда относительно приложения напряжения снижается по мере увеличения давления.

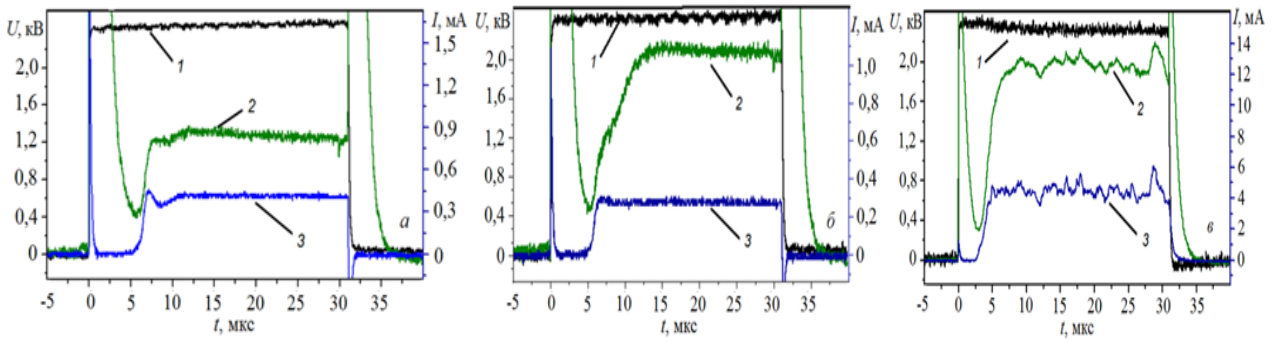


Рис. 2. Импульсы напряжения на аноде (*1*), тока разряда (*2*) и вытягиваемого тока (*3*) при давлении 5 (*а*), 7 (*б*), 12 мТорр (*в*)

Давление в источнике ионов трубки влияет не только на абсолютные показатели зависимостей тока разряда от напряжения, но и определяет их общий вид (рис. 3). Участки с нарастающими и нисходящими характеристиками указывают на то, что разряд при изменении напряжения питания может переходить в различные моды горения.

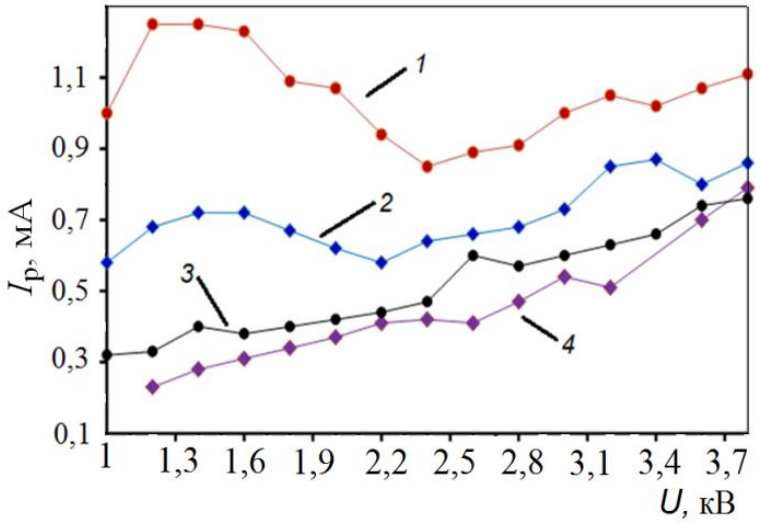
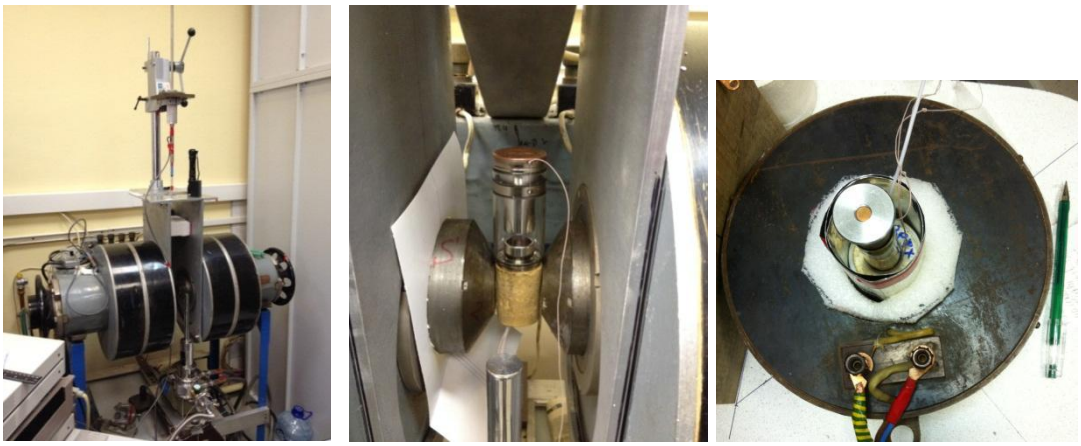


Рис. 3. Зависимость тока разряда от напряжения при давлении газа 7 (*1*), 6 (*2*), 5 (*3*), 3 мТорр (*4*)

Далее проводилось исследование режимов работы нейтронной трубки в условиях действия внешнего магнитного поля. Для этого был создан экспериментальный стенд, состоящий из электромагнита с источником питания, который создавал радиальное (поперечное) однородное магнитное поле в разрядном промежутке нейтронной трубки, и катушки с током, которая создавала осевое (продольное) однородное магнитное поле (рис. 4). Работоспособность нейтронной трубки была проверена как для случая без

магнитной защиты, так и при использовании дополнительных экранов, охватывающих ионный источник. В качестве исследуемых параметров были ток дрейфа ионов рабочего газа от источника Пеннинга к мишени трубки, длительность импульса тока в ускорительном промежутке и его форма. В качестве магнитного экрана применялась лента из пермаллоя 45Н общей толщиной 2 мм и цилиндр диаметром 70 мм (Ф70) с толщиной стенок 8,5 мм из магнитной стали, имитирующий прочный корпус аппаратуры ИНГКС.



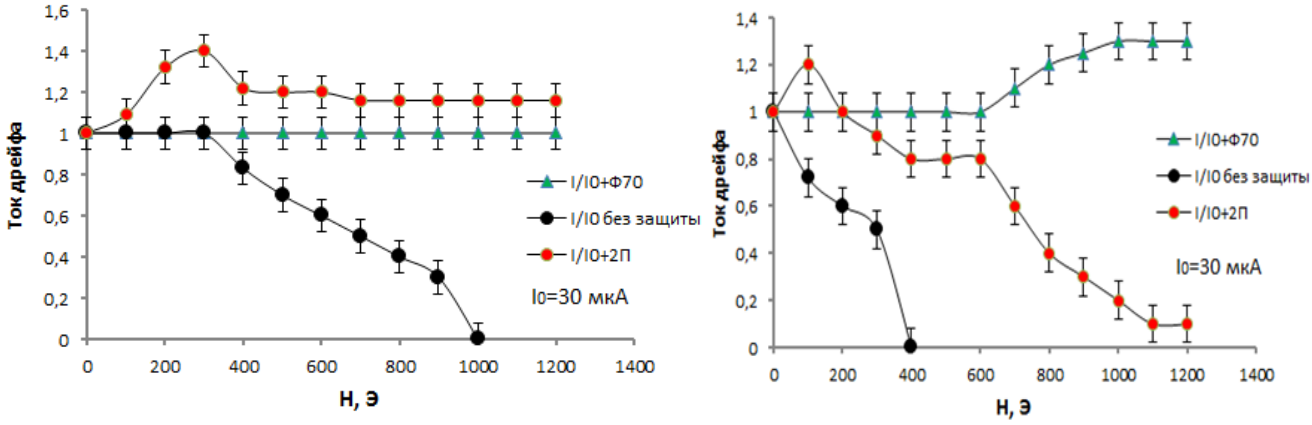
а) б) в)

Рис. 4. Электромагнит поперечного поля (*а*), нейтронная трубка, помещенная в электромагнит (*б*), катушка для создания осевого магнитного поля (*в*)

Анализ полученных результатов показал, что ток дрейфа в случае, когда магнитная защита не установлена, резко снижается при незначительном значении внешнего магнитного поля. Далее наблюдается небольшое увеличение тока дрейфа и длительности импульса (при 150 Э). При дальнейшем увеличении внешнего магнитного поля ток дрейфа резко уменьшается, и разряд гаснет при 400 Э. Нестабильность в работе трубки также проявляется и в том случае, если она защищена магнитным экраном из пермаллоя, что отличается от результатов, полученных при измерениях в поперечном поле. При наличии магнитного экрана в виде цилиндра из магнитной стали (прочного корпуса) внешнее поле не оказывает никакого влияния на токовые характеристики ГНТ вплоть до значения 500 Э (рис. 5).

Далее происходит незначительный рост тока дрейфа ионов и выход в область стабильного горения разряда.

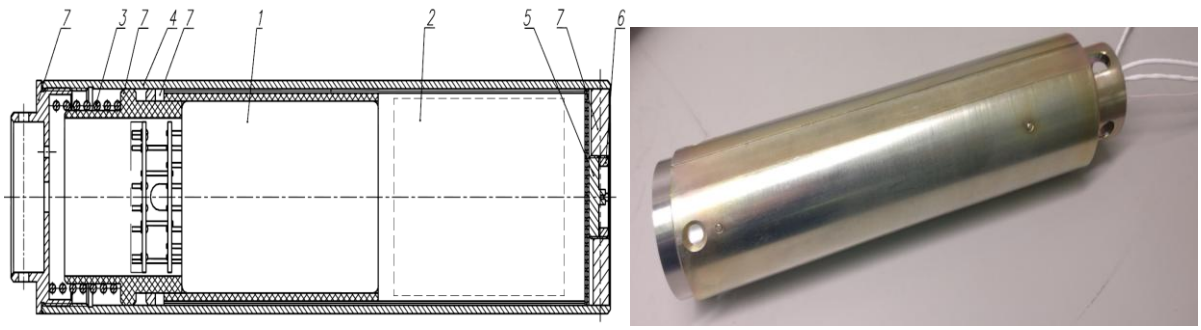
В результате экспериментов, проведенных на нейтронной трубке, автором установлено, что продольное поле оказывает большее действие на токовые характеристики ионного источника, чем поперечное. Критическое поле в случае продольного расположения составляет около 100 Э, тогда как в случае поперечного – более 300 Э. Для защиты от влияния поперечного поля достаточно тонкого экрана из пермаллоя, тогда как для экранировки продольного поля необходимо использовать прочный корпус из магнитной стали.



а) б)

Рис. 5. Зависимости тока дрейфа нейтронной трубки: а) – в поперечном магнитном поле, б) – в продольном магнитном поле. 2П – 2 слоя пермаллоя. Ф70 – цилиндр из магнитной стали

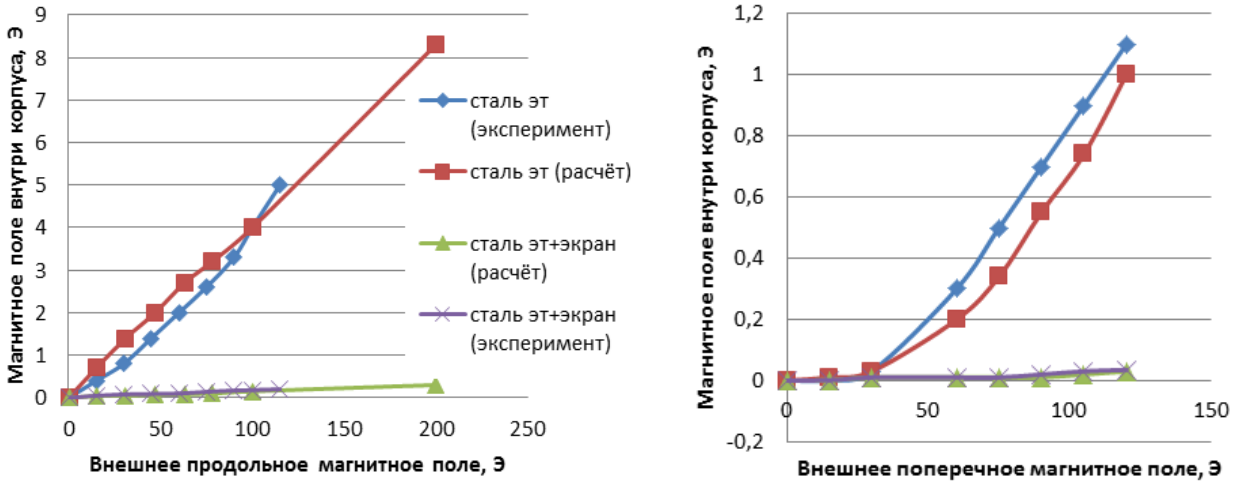
Для обеспечения эффективной экранировки ФЭУ от магнитного поля уровня 100Э автор предложил конструкторско-технологическое решение, которое решает данную задачу. Особенность состоит в том, что конструкция блока детекторов представляет собой единый узел с общим корпусом из магнитного материала, в котором размещены ФЭУ и сцинтилляционный кристалл (рис. 6). В этом случае сам корпус исполняет роль экрана.



а) б)

Рис. 6. Блок детектора прибора ИНГКС с магнитной защитой а) - конструкция: 1 – ФЭУ, 2 – сцинтилляционный кристалл, 3- пружина, 4 – корпус, 5 – винт, 6 – гайка, 7 – втулки; б) – внешний вид

Корпус представляет собой цилиндр с толщиной стенки 2,2 мм. Для различных материалов корпусов с помощью расчетов, подтвержденных экспериментально, были получены зависимости эффективности экранировки от внешнего магнитного поля (рис. 7). Данные зависимости могут быть использованы при проектировании новых изделий, где требуется экранировка чувствительных элементов от воздействия внешнего магнитного поля. Из предложенных вариантов корпуса оптимальным оказался корпус, изготовленный из электротехнической стали с дополнительным экраном из ленты 79НМ толщиной 0,5 мм. Такая конструкция эффективно экранирует магнитные поля скважины в 100 Э и выше (до 200 Э).



а) б)

Рис. 7. Результаты экспериментов по оценке эффективности экранировки: а) – продольного, б) – поперечного магнитного поля с помощью корпуса блока детектора

Третья глава посвящена исследованиям, которые направленны на разработку радиационной защиты детекторной части аппаратуры ИНГКС.

Для того, чтобы обеспечить эффективную радиационную защиту, необходимо, чтобы в её составе использовались элементы с высоким сечением захвата тепловых нейтронов. В качестве таких материалов автором рассматривались: бор, кадмий, гадолиний и литий. Проведенный анализ показал, что в качестве материала защиты детекторной части каротажной аппаратуры ИНГКС наиболее приемлемой, технически и экономически обоснованной является защита из бора. В этом случае не образуется дополнительного фонового гамма-излучения от самой защиты и данный материал является стабильным, неядовитым и не требует дополнительных мер безопасности при работе с ним.

Как показал результат расчета, для ослабления потока тепловых нейтронов на два порядка оптимальная толщина защиты, которая представляет собой природную смесь изотопов бора (20% ^{10}B и 80% ^{11}B) и связующего, составила 1 мм.

Для того, чтобы оценить эффективность предложенной радиационной защиты, было выполнено математическое моделирование. Эффективность защиты оценивалась как отношение двух суммарных счетов гамма-квантов во всем диапазоне энергий: счет гамма-квантов, зарегистрированных от прибора и счет гамма-квантов, зарегистрированных от прибора и скважины (пласт, цементное кольцо, обсадная труба, скважинная жидкость). Отношение этих двух счетов показывает вклад радиационного фона от прибора в общий спектр. Из результатов моделирования следует, что борная защита позволяет снизить долю фона в регистрируемом спектре с 33% до 10% для дальнего и с 47% до 17% для ближнего детекторов. Таким образом, применение борной защиты толщиной в 1 мм позволяет ≈ в 3 раза уменьшить радиационный фон, тем самым позволяя регистрировать более качественные спектры гамма-квантов, что обеспечивает большую точность измерений прибором.

Защита помимо своих радиационных свойств должна также обладать стойкостью к тяжелым условиям эксплуатации аппаратуры: воздействию агрессивных сред, истиранию об обсадную колонну и пр., что существенно осложняет задачу. Автором были опробованы различные технологии нанесения борсодержащего покрытия и получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты по отработке технологии нанесения борсодержащих покрытий

Технология нанесения	Плазменная металлизация	Сверхзвуковая газодинамическая металлизация	Электродуговая металлизация	Воздушно ионно-плазменное напыление
Результаты	Отслоение покрытия	Низкое содержание бора	Низкое содержание бора	Низкое содержание бора

Так как не удалось получить прочного, стойкого к механическим воздействиям покрытия с высоким содержанием бора, автор предложил и обосновал другой способ формирования защиты. Он заключается в нанесении порошка карбида бора, смешанного с композитным связующим (смола, клей, компаунд, цемент), в проточку на наружной поверхности охранного кожуха. При этом снаружи покрытие герметично закрыто тонкостенной оболочкой в виде трубы из нержавеющей стали (рис. 8).

Такое конструкторско-технологическое решение было реализовано в кожухе аппаратуры АИНК-73С-2, АИНК-89С-2. Исследования защитных свойств корпуса от воздействия тепловых нейтронов, показали, что данный способ нанесения покрытия обеспечивает необходимую концентрацию атомов бора. Механические свойства защитной внешней тонкостенной оболочки были проверены на 7 корпусах при работе аппаратуры на месторождениях Западной Сибири. В результате эксплуатации было показано, что имеющая защитная оболочка обеспечивает сохранность борного покрытия от воздействия внешних факторов в течение срока службы аппаратуры.

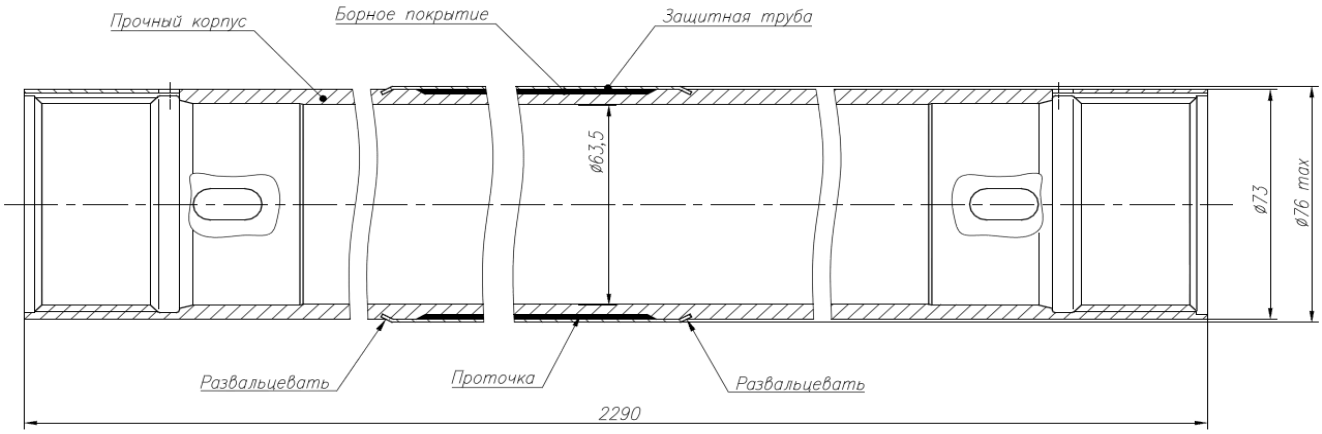


Рис. 8. Эскиз охранного кожуха с борной защитой

Эффективность разработанной борной защиты была экспериментально исследована на корпусах в составе аппаратуры. Анализ зарегистрированных спектров (рис. 9) показал, что подавление фона с помощью радиационной защиты, позволяет получить более дифференцированные спектры с ярко выраженными характерными пиками для основных породообразующих химических элементов и флюида.

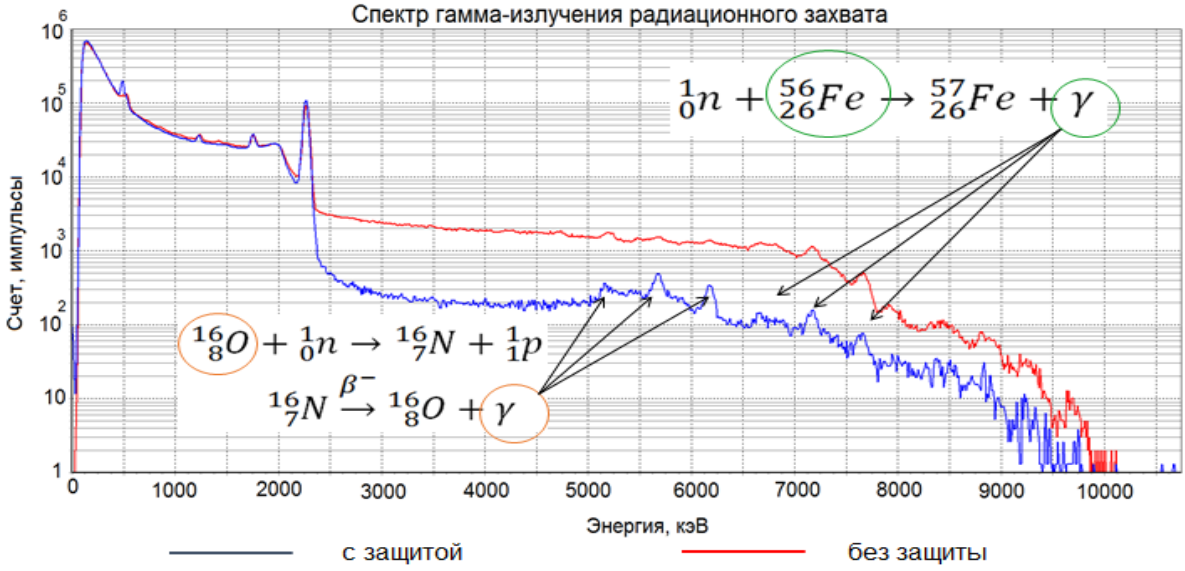


Рис. 9. Спектры гамма квантов, зарегистрированных в баке с водой для двух типов корпусов

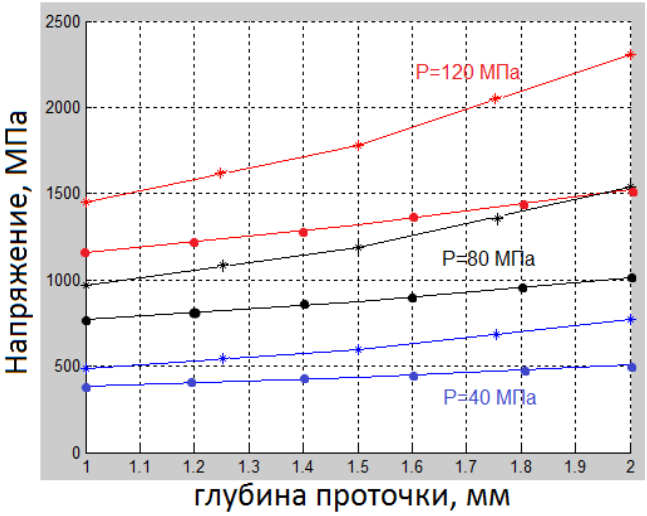
В **Четвертой главе** изложены исследования по обеспечению механической прочности корпуса. При расчёте прочности корпуса, как правило, не учитываются такие факторы как проточки, несоосности, несквозные отверстия и т.д. Однако, данные факторы могут существенно

влиять на прочность корпуса, что подчеркивает актуальность и новизну решаемой задачи.

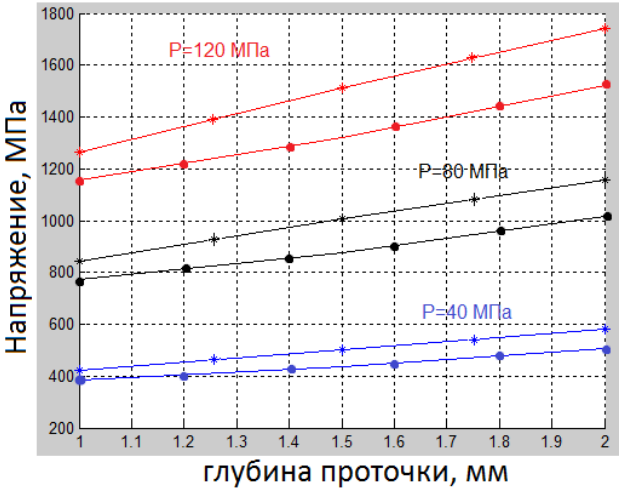
Из анализа результатов, полученных автором, было установлено, что в местах, где имеется проточка, значение механического напряжения в 1,5 раза больше, чем в местах её отсутствия.

Одним из главных факторов, оказывающих влияние на прочность корпуса, оказалась его разнотолщинность. Разнотолщинность может быть обусловлена исходной заготовкой, то есть имеет место несоосность внешнего и внутреннего диаметров или появиться в процессе выполнения проточки. Наличие данного фактора приводит к возникновению неравномерного распределения напряжения с концентраторами в месте наименьшей толщины.

Моделированием показано, что дополнительный вклад в величину напряжения в корпусе за счет несоосности достигает существенных величин (до 500 МПа и более) (рис. 10).



а)



б)

Рис. 10. Зависимость напряжения от глубины проточки для различных давлений при несоосности: а) в 1,0 мм (графики с *) и её отсутствии (графики с ●), б) в 0,5 мм (графики с *) и её отсутствии (графики с ●)

В результате аналитической аппроксимации расчетных кривых была получена формула, имеющая вид выражения, в котором напряжение представлено как функция от давления и глубины проточки:

$$\sigma = P \cdot b \cdot h^2 + c \cdot P,$$

где σ – напряжение, h – глубина проточки, P – внешнее давление, b, c – численные коэффициенты от соосности. Эта формула позволяет выполнять инженерные расчеты механических напряжений с учётом различных несоосностей.

Полученные расчетные результаты были экспериментально проверены на образцах прочных корпусов. Эксперименты проводились в ОАО ВНИПИ «Взрывгеофизика» в сосуде высокого давления. Установлено, что результаты физического моделирования с хорошей точностью согласуются с результатами расчётов.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Результатами расчетов и экспериментальных исследований продемонстрирована эффективность экранировки нейтронной трубки от внешнего магнитного поля со стороны обсадной колонны скважины с помощью прочного корпуса из магнитной стали. Такой способ экранировки обеспечивает защиту от магнитных полей напряженностью до 1200 Э, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании аппаратуры ИНГКС.

2. Предложена новая конструкция блока детекторов, обеспечивающая экранировку ФЭУ от внешнего магнитного поля напряженностью до 200 Э, особенность которой заключается в том, что роль экрана выполняет общий корпус детекторов, в котором размещен сцинтилляционный кристалл с ФЭУ.

3. Результатами экспериментов показано, что в миниатюрном ионном источнике Пеннинга для аппаратуры ИНГКС область зажигания устойчивого разряда соответствует узкому диапазону давления 3 – 6 мТорр (0,4-0,8 Па).

4. С целью снижения уровня гамма-фона на детекторах разработано конструкторско-технологическое решение, заключающиеся в нанесении смеси

борного порошка со связующим на наружную поверхность прочного корпуса. Для защиты и обеспечения механической стойкости покрытие снаружи герметично закрыто оболочкой в виде тонкостенной трубы из нержавеющей стали. Предложенное решение и технология были практически реализованы в корпусах аппаратуры АИНК-73С-2 и АИНК-89С-2. Многолетняя эксплуатация таких корпусов подтвердила правильность выбранных решений.

5. Предложена уникальная технология нанесения радиационной защиты, состоящей из порошка карбида бора, смешанного со связующими типа клея, компаунда, цемента. Оптимальная толщина защиты составляет 1 мм, что позволяет ослабить поток тепловых нейтронов на два порядка.

6. Показано, что при наличии проточки необходимо учитывать напряжения, вызванные несоосностью. Для инженерных расчетов автором предложены эмпирические формулы, позволяющие выполнять расчеты механических напряжений с учётом несоосностей в 0,5, 1,0, 1,5 мм.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Рачков Р.С., Юрков Д.И., Пресняков А.Ю., Исследование влияния магнитного поля скважины на нейтронную трубку геофизической аппаратуры// Атомная энергия, 2019 №6 (126), С. 334-337.

2. Рачков Р.С., Юрков Д.И., Масленников С.П., Исследование амплитудно-временных характеристик разряда Пеннинга в миниатюрных ионных источниках// Атомная энергия, 2019 №1 (127), С. 39-43.

3. Патент 168744 РФ U1 G01V 5/10. Устройство для импульсного нейтронного спектрометрического гамма-каротажа / Шоленинов С.Э., Рачков Р.С., Копылов С.И., Асосков П.Ю. (Россия) - №2016125269; Заявлено 24.06.2016; Опубл. 17.02.2017, Бюл. №5.

4. Патент 186408 РФ U1 G07T 7/00. Магнитный экран для скважинных геофизических приборов / Рачков Р.С., Копылов С.И., Асосков П.Ю., Шоленинов С.Э. (Россия) - №2018130742, Заявлено 24.08.2018; Опубл. 21.01.19, Бюл. №3.

5. Рачков Р.С. Способы решения проблемы комплексного воздействия гидростатического давления, тепловых нейтронов и электромагнитного поля на аппаратуру импульсного нейтронного каротажа (ИНК) с помощью охранного кожуха // Нейтронные генераторы и аппаратура на их основе: сборник тезисов XI научно-технической конференции «ВНИИА-2017», 9-31 марта 2017 г. – Москва: С. 41.

6. Рачков Р.С. Исследование влияния магнитных свойств охранного кожуха на работу нейтронного генератора и ФЭУ // Нейтронные генераторы и аппаратура на их основе: сборник докладов X научно-технической конференции «ВНИИА-2016», 9-31 марта 2017 г. – Москва: С. 353-356.

7. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю. Исследование эффективности экранировки нейтронной трубки и ФЭУ от магнитного поля обсадной колонны скважины с помощью охранного кожуха // Ядерная физика и инжиниринг, 2016, том 7, №2, С. 162-167.

8. Рачков Р.С., Копылов С.И., Шоленинов С.Э., АсосковП.Ю.Особенности радиационной защиты детекторов аппаратуры ИНГКС от тепловых нейтров // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам VI Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – № 6(5). – М., Изд. «Интернаука», 2017. – С. 79-84.

9. Рачков Р.С., Асосков П.Ю., Копылов С.И., Шоленинов С.Э. Разработка нейтронной защиты для детекторной части аппаратуры спектрометрического импульсного нейтронного гамма-каротажа // Инженерная физика, 2018, №1, С. 8-12.

10. Рачков Р.С., Асосков П.Ю., Копылов С.И., Шоленинов С.Э. Критерий прочности для корпуса аппаратуры ИНГКС // Прочность, живучесть и безопасность машин: сборник трудов XXIX Международной конференции «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов», 6-8 декабря 2017 г. - М: Изд-во ИМАШ РАН, 2018 - С. 112-115.

11. Рачков Р.С., Асосков П.Ю., Копылов С.И., Экспериментальное исследование эффективности экранировки нейтронной трубки от внешнего магнитного поля с помощью прочного корпуса// Инженерная физика, 2018, №3, С.10-14.

12. Рачков Р.С. Разработка конструкции магнитной защиты для ФЭУ в блоке детекторов каротажных приборов ИНГК-89С-2, ИНГК-73С-2// Нейтронные генераторы и аппаратура на их основе: сборник тезисов XII научно-технической конференции «ВНИИА-2018», февраль – март 2018 г. – Москва: С.34.

13. Рачков Р.С., Бусайд И.Г., Асосков П.Ю., Разработка способа защиты ФЭУ в блоках детектирования скважинной аппаратуры ИНГКС от магнитных полей// Технологии электромагнитной совместимости, 2018 №3 (66), С. 7-14.

14. Рачков Р.С., Бусайд И.Г., Шоленинов С.Э., Защита ФЭУ в блоках детектирования скважинной аппаратуры от магнитных полей// Электрофизическое и ядерное приборостроение: сборник научных трудов часть 2 V Международной конференции «Лазерные и, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2019», 12-15 февраля 2019 г. - М: НИЯУ МИФИ, 2019 - С. 250-251.