

УЧЕНЫЕ – ИЗОБРЕТАТЕЛИ

УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

К 90-летию изобретения С.Я. Соколова. Обзор.*

Часть 2. Этап интеллектуальных технологий ультразвукового контроля (окончание)

...в стороне от базара и славы жили издавна
изобретатели новых ценностей.

Фридрих Ницше



БОБРОВ Владимир Тимофеевич

Д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва

...здоровая жизнедеятельность научного института сопровождается воспитанием молодежи, кадров, которые, отпочковываясь, создают самостоятельные институты и лаборатории, в которых развиваются новые направления.

Акад. П.Л. Капица

Развитие теории ЭМА-возбуждения УЗК

Серьезный вклад в развитие теории электромагнитно-акустических (ЭМА) методов возбуждения и регистрации ультразвуковых волн внес последователь проф. Ю.М. Шкарлета доктор физ.-мат. наук, проф. Юрий Иванович Сазонов.

Ю.И. Сазонов окончил Вильнюсское радиотехническое училище войск ПВО страны (радиолокационные системы), радиофизический факультет Московского физико-технического института, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, аспирантуру ЦНИИТМАШ.

В 1971 г. Ю.И. Сазонов в Акустическом институте защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Исследование электромагнитных методов возбуж-

дения и регистрации ультразвуковых волн», в 2004 г. в Московской государственной академии приборостроения и информатики – диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» на тему «Волновые электромагнитно-акустические явления в конденсированных средах и физические методы их использования».

Научно-педагогическая деятельность Юрия Ивановича связана с разработкой и исследованием физических методов и приборов контроля и диагностики изделий ракетно-космической техники.

Ю.И. Сазоновым установлены ранее неизвестные закономерности и специфика в распределении упорядоченно движущихся электронов в конденсированных средах при электромагнитных воздействиях, открыты ранее неизвестные явления компенсации векторов лоренцовых сил, действующих на электроны, и векторов магнитных сил в электропроводящих, ферромагнитных средах, расположенных в электромагнитных полях произвольной структуры, и изменения электронной проводимости металлов и сплавов при воздействии мощного потока электронов. Им открыто ранее неизвестное явление изменения электронной проводимости металлов и сплавов при воздействии мощного потока электронов, разработана теория электромагнитно-акустических явлений в конденсированных слоистых безграничных и ограниченных средах, которая позволяет определять время релаксации электронов в твердых телах, сформулированы физические принципы опти-



Ю.И. Сазонов

* Начало см. «Территория NDT». 2019. №1, 2.

мальной генерации и приема звуковых и ультразвуковых волн в различных средах с учетом электронной проводимости, магнитной проницаемости и акустических характеристик среды.

Юрий Иванович активно участвует в работе научных организаций и журналов, он член-корреспондент Российской академии естествознания, действительный член Академии проблем безопасности, обороны и правопорядка РФ по отделению физико-математических проблем техногенных и экологических катастроф, действительный член Европейского и Российского акустических обществ, главный редактор теоретического и научно-практического сборника «Прикладная математика и техническая физика». Результаты исследований проф. Ю.И. Сазонова опубликованы более чем в 200 научных и учебно-методических работах в центральных академических и отраслевых изданиях России и за рубежом. О новизне полученных им результатов свидетельствуют 27 авторских свидетельств и патентов на изобретения ультразвуковых способов и преобразователей.

Ю.И. Сазонов награжден медалью им. акад. В.П. Глушко и нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», медалью «Ю. Гагарин. 50 лет космонавтике», Российской академией естествознания ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и образования», присуждена премия им. М.В. Ломоносова с вручением золотой медали (<https://famous-scientists.ru/2027>).

Вклад ученых НТУ «ХПИ»

В 1995 г. в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» была образована кафедра «Приборы и методы неразрушающего контроля». На базе кафедры открывается специализированный ученый совет Д 64.050.09, председатель д-р техн. наук, проф. В.П. Себко, ученый секретарь доц. Б.М. Горкунов, в котором защищают диссертации молодые аспиранты кафедры. В настоящее время в состав совета входят два преподавателя кафедры: доц. С.Н. Глоба (ученый секретарь спецсовета), проф. Г.М. Сучков (заместитель председателя спецсовета).

С января 2010 г. кафедру возглавил д-р техн. наук, проф. Григорий Михайлович Сучков, который пришел на кафедру в 2002 г. из Украинского научно-исследовательского государственного института металлов с огромным опытом работы в области неразрушающего контроля промышленной продукции. В 2005 г. Г.М. Сучков в специализированном ученом совете Д 64.050.09 успешно защитил докторскую диссертацию, в 2008 г. ему было присвоено ученое звание профессора, под его руководством прошли обучение в аспирантуре многие выпускники университета.

С 2001 по 2004 гг. кафедра была участником международного договора с Лионским католическим университетом по программе TEMPUS, благодаря

которой молодые специалисты кафедры повышали профессиональный уровень на стажировках во Франции (<https://scholar.google.com.ua/citations?user=JyrE3p4AAAAJ&hl=ru>).

На кафедре ведутся научные исследования в области акустического и других видов неразрушающего контроля. К ним относятся исследования ЭМА-методов возбуждения ультразвуковых волн, разработка компьютеризированных приборов, установок, систем, генераторов, усилителей, преобразователей для контроля качества, диагностики и экологического мониторинга, разработка программного обеспечения функционирования средств контроля и диагностики и др.

Под руководством д-ра техн. наук, проф. Г.М. Сучкова с применением математического моделирования на кафедре (в настоящее время «Кафедра компьютерных и радиоэлектронных систем контроля и диагностики») выполнены исследования ЭМА-способа контроля, разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемно-закаленных рельсов и стального металлопроката. Проф. Г.М. Сучков был научным консультантом Б.М. Горкунова, который в 2011 г. блестяще защитил докторскую диссертацию в специализированном ученом совете Д 64.050.09. Аспиранты и магистры под руководством ведущих преподавателей кафедры регулярно принимают участие в международных научно-технических и научно-практических конференциях Украины, России и других стран. По результатам исследований и разработок проф. Г.М. Сучковым опубликовано более 240 научных трудов, в том числе четыре монографии, запатентованы 76 изобретений (https://web.kpi.kharkov.ua/pmnk/ru/staff_ru/).

Вклад ученых ЗАО «НОРДИНКРАФТ»

Впервые фирма «Нординкрафт» появилась на рынке в 1989 г., а начиная с 1992 г. она действует со 100%-ным частным капиталом. На протяжении последующих 25 лет развития она была преобразована в промышленную группу, активно и плодотворно работающую в области неразрушающего контроля. Президентом группы «Нординкрафт» является канд. техн. наук Андрей Васильевич Кириков.

Один из первых проектов фирмы – оборудование для автоматического ультразвукового контроля электросварных труб с применением электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей, был реализован ООО «Компания Нординкрафт» на предприятии ОАО «Северсталь» в 1994 г. В 1996 г. в первом листопрокатном цехе этого же предприятия бы-



Г.М. Сучков



А.В. Кириков

ла успешно запущена в промышленную эксплуатацию первая в мире установка для бесконтактного ультразвукового контроля листового проката «Север-1». ЭМА-технология была успешно применена фирмой «Нординкрафт» на российских предприятиях – Волжском трубном и Челябинском трубопрокатном заводах. Впоследствии эта технология была реализована на трубных заводах во Вьетнаме и Китае.

Одна из наиболее сложных технических задач, стоящих перед металлургической отраслью, – осуществление высокотемпературного ультразвукового контроля листового проката в потоке его производства – была впервые решена компанией «Нординкрафт» в 2002 г. Первая в мире установка для автоматического ультразвукового контроля листового проката с температурой до +650 °С и шириной до 5000 мм была внедрена в ЛПЦ-3 ОАО «Се-



В.А. Бритвин

версталь». К 2003 г. многие предприятия России, Украины и Беларуси оснастили свои линии оборудованием, спроектированным и изготовленным группой «Нординкрафт». Подобное оборудование было поставлено на предприятия Украины, Китая, Японии и Венесуэлы.

Технологии и технические решения компании «Нординкрафт», к которым относятся, прежде всего, ЭМА-технология, технология контроля на основе пьезопреобразователей и технология ультразвуковых фазированных решеток, получили широкое международное признание и многочисленные награды на выставках и конференциях.

В 2006 г. в городе Хаймсхайм (Heimsheim) на юге Германии специалистами «Нординкрафт» создана и результативно сотрудничает с ведущими мировыми производителями компания NK NORDINKRAFT. В числе ее клиентов концерн VOLKSWAGEN, Tokyo Steel, NIPPONSteel, MITSUBISHI, TISCO, BAOSTEEL, XIANGTAN, YALIAN, HAN-DAN, HAEUSLER, SMS MEER, POSCO и др. Разработанный специалистами компании NK NORDINKRAFT роботизированный комплект оборудования ALUTEST-PL предназначен для автоматического, высокопроизводительного УЗ и вихретокового контроля листового проката и слэбов в соответствии с международными стандартами. Совместно с япон-

ской фирмой Nakata по заказу Объединенной металлургической компании (ОМК) «Нординкрафт» участвует в крупном международном проекте по строительству нового центра по производству электросварных труб.

Сервисные центры компании максимально приближены к производству, что дает возможность в минимальные сроки устранять неполадки оборудования или оптимизировать процесс контроля; разработана гибкая система взаимосвязей, целью которой является оптимизация производственного процесса и повышение качества продукции, сервисные центры созданы на Урале (Челябинск) и Украине (Алчевск). Представительства компании NK NORDINKRAFT открыты в Европе (Австрия, Франция, Испания, Италия и др., всего более 20 стран), Азии (Китай, Япония и др.), Америке (Бразилия и США).

Компания «Нординкрафт» стала победителем конкурса «Лидер промышленности РФ 2017» в номинации «Промышленное оборудование», лауреатом выставки «Металл-Экспо 2017» и была награждена серебряной медалью этой выставки, вошла в состав 100 лучших организаций золотого фонда Торгово-промышленной палаты России, стала лауреатом Всероссийского конкурса программы «100 лучших товаров России» и др.

В активе специалистов ООО «Компания «Нординкрафт» около 50 патентов, в том числе международных, и более 25 патентов на изобретения (<http://www.nordinkraft.de/about/history/>).

Вклад ученых ЗАО «Ультракraft»

ЗАО «Ультракraft» функционирует с 2010 г., возглавляет его генеральный директор Владимир Александрович Бритвин. Специализация предприятия – выпуск наукоемкого и инновационного оборудования для неразрушающего контроля продукции металлургической и трубной промышленности. ЗАО «Ультракraft» осуществляет проектирование, производство и внедрение промышленных комплексов ультразвукового и вихретокового контроля для предприятий черной и цветной металлургии (контроль листового проката, труб, сортового проката, непрерывно литой заготовки и др.).

Роботизированные системы и установки, используемые в дефектоскопии на металлургических предприятиях, разрабатываются в инженерном отделе, специалисты фирмы обеспечивают монтаж и запуск оборудования на производстве. В деятельности ЗАО «Ультракraft» широко применяются принципы кооперации. Партнерами компании, основными поставщиками и потребителями являются такие предприятия и ведомства, как ПАО «Северсталь», Ижорский трубный завод, Челябинский трубопрокатный завод, «Газпром», «Транснефть», Объединенная металлургическая компания, Трубная металлургическая компания, SYTCO AG, HAEUSLER AG и др.

Основное направление деятельности ЗАО «Ультракraft» – проектирование и изготовление автоматизированных ультразвуковых комплексов с применением технологии электромагнитно-акустического возбуждения и приема ультразвука (ЭМА-технологии), имеющей ряд недостижимых для других, в том числе и пьезотехнологии, преимуществ. В результате созданная ЗАО «Ультракraft» впервые в мире автоматизированная система ЭМА-технологии контроля листового проката для производства магистральных нефте- и газовых труб большого диаметра успешно прошла квалификацию стандарта DNV, указанного в требованиях к поставщикам продукции на такие глобальные проекты, как «Северный поток» и «Южный поток». Роботизированные установки, разработанные и производимые ЗАО «Ультракraft», закупают ведущие заводы мира, в том числе США, Швейцарии, Франции и Японии, стоимость некоторых поставляемых роботов составляет от полутора до двух миллионов евро.

Компанией «Ультракraft» получено преимущественное право приоритета на 35 патентов в том числе и международных. В портфолио ЗАО «Ультракraft» около 30 запатентованных изобретений, разработки компании трижды удостоены диплома 100 лучших товаров России (<https://www.ultrakraft.ru/ru/ultrakraft>).

Изобретения ученых НПП «Алтек»

Группа компаний «Алтек» с 1997 г. работает в области создания ручных, механизированных и автоматизированных средств ультразвукового и вихревого неразрушающего контроля. Возглавляет НПП «Алтек» генеральный директор Александр Теодорович Казаченко. Основу коллектива составляют ученые и инженеры, имеющие большой опыт работы в области контроля качества изделий различными методами, основные из которых – ультразвуковой и вихревой. Ведущие специалисты предприятия занимаются выполнением НИОКР, разработкой, изготовлением приборов на основе современных достижений приборостроения и уникальных технологий.

В 1998 г. компания «Алтек» разработала и внедрила первый отечественный перепрограммируемый ультразвуковой дефектоскоп «Пеленг» УД2-102, который является массовым прибором ультразвукового и вихревого контроля в России и странах Таможенного союза. Дефектоскопы семейства «Пеленг» используются в ключевых отраслях промышленности РФ (нефтегазовая, железнодорожная, теплоэнергетическая, судостроительная, металлургическая, атомно-энергетическая и др.).

Семейство автоматизированных комплексов неразрушающего контроля включает в себя автоматизированный комплекс ультразвукового и вихревого контроля колесных пар вагонов PELENG-AUTOMAT (модификация MC-B), установку

«Алтек-Автомат УЗ-И», предназначенную для контроля изделий сложной конфигурации из титановых и жаропрочных сплавов и изделий из других металлических материалов.

Автоматизированный комплекс ультразвукового контроля колесных пар вагонов «Пеленг-автомат» разработан и изготовлен предприятием группы «Алтек» совместно с ГУП ПКБ ЦВ и ГУП ВНИИЖТ ОАО «РЖД» по заказу департамента вагонного хозяйства ОАО «РЖД». Комплекс в течение 2002 – 2003 гг. прошел все виды испытаний, сертифицирован и рекомендован, в том числе департаментом безопасности движения и экологии ОАО «РЖД», в эксплуатацию. С 2004 г. комплексы поставляются на железные дороги ОАО «РЖД» в рамках Программы безопасности.

Основные технические решения специалистов предприятия защищены патентами РФ на изобретения, авторами которых являются А.Т. Казаченко, С.Л. Молотков, В.А. Лысов и др. (<http://altek.ru/o-kompanii>).

Развитие импедансного метода НК

В 80-х гг. прошлого столетия изобретатель импедансного метода НК Ю.В. Ланге был приглашен и приступил к исследованиям в НИИ интроскопии (Москва), где под его руководством были разработаны дефектоскопы АД-50У и АД-60С и др. Более 45 лет ученик Ю.В. Ланге – д-р техн. наук В.В. Мурашов трудится в ВИАМе, работая по направлениям «Неразрушающий контроль многослойных клееных конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов» и «Диагностика состава, структуры и свойств полимерных композиционных материалов». Разработки ученого использованы при создании материалов и изготовлении деталей и конструкций почти всех известных советских и российских самолетов. В.В. Мурашов – автор более 120 опубликованных научных работ и 30 изобретений.

В 2000 г. фирмой Votum, Молдова, (А.М. Сляднев, В.Н. Сырбу и др.) разработан первый портативный компьютеризированный импульсный импедансный дефектоскоп «ДАМИ-С». Его модификация – дефектоскоп «ДАМИ-С09» сочетает в себе импедансный, вихревой и ударный методы НК и предназначен для выявления расслоений, непроклеев и других нарушений целостности композитов, сотовых структур и клееных конструкций, определения очагов коррозии, поверхностных и внутренних дефектов в ферромагнитных материалах.



А.Т. Казаченко



В.В. Мурашов

В отличие от импульсных дефектоскопов предыдущих модификаций в «ДАМИ-С09» возбуждаются не свободные, а вынужденные колебания. Предусмотрен автоматизированный режим настройки сигнала по амплитуде или фазе с использованием анализатора спектра, имеется возможность представления на дисплее меню параметров режима работы, частот, формы используемых импульсов и их спектров. Прибор оснащен акустической системой связи координат преобразователя «Слайдер-М2» с изображением на его дисплее, что позволяет наблюдать вид ОК в плане с выявленными дефектами и автоматически определять их площади. Режимы настройки и результаты контроля могут длительно храниться в энергонезависимой памяти прибора. Предусмотрены различные способы обработки информации, режимы ручной и автоматической настройки прибора.



А.М. Сляднев

Значительный вклад в разработку технологии импедансного метода и внедрение дефектоскопа «ДАМИ-С09» внесли специалисты Научного центра по поддержанию летной годности воздушных судов (НЦ ПЛГВС) ГосНИИ ГА Н.Т. Азаров, Ю.М. Фейгенбаум, Ю.А. Миколайчук и сотрудники ВИАМ д-р техн. наук В.В. Мурашов и др., руководитель подразделения по НК ОАО «Туполев» В.Н. Цирг и др.

Массовое производство роботов-манипуляторов создало предпосылки для разработки на их основе специальных робототехнических комплексов (РТК), обеспечивающих их применение в НК. Однако многообразии контролируемых и измеряемых параметров потребовало поиска новых принципов организации работы РТК. В ООО НПК «Техновотум» (А.М. Сляднев и др.) разработана многофункциональная роботизированная установка «Робоскоп», предназначенная для осуществления преимущественно бесконтактных методов НК широкого спектра деталей с расширенными возможностями быстрой перенастройки и адаптации к объектам различных форм и типоразмеров.

Впервые ООО «НПК «Техновотум» разработало технологию сочетания сменных инструментов и интегрированных в одной установке методов НК. Выбор метода контроля и смена рабочих преобразователей осуществляются автоматически в соответствии с вы-

полняемой методикой контроля, обеспечивая заданную скорость и траекторию перемещения, а также необходимую точность позиционирования и угол наклона преобразователей. Электронный блок контроля обеспечивает настройку аппаратуры по данным, принятым с программы на ПК, устойчивую работу при скорости сканирования объекта контроля до 100 мм/с, прием команд управления и передачу данных контроля на ПК.

Результаты исследований реализованы в виде стендов «Робоскоп ВТМ-5000/АД» во ФГУП ГОСНИИ ГА, «Робоскоп ВТМ-5000/КП, /ПВ, /РД» и других во ФГУП Московский метрополитен, стенда лазерного сканирования и дефектоскопии «Робоскоп ВТМ-5000/АС» в ОАО «РЖД» и др.

Все виды контроля и типы приборов и систем отработаны в реальных условиях на объектах потребителей, сертифицированы, внедрены в промышленных установках компании ООО НПК «Техновотум», защищены патентами на изобретения и полезные модели.

Компания поддерживает и развивает экспертную деятельность с общественными организациями в области НК для многих отраслей промышленности, входит в научно-технический совет Национального союза железнодорожников, в Совет по НК гражданской авиации РФ, в экспертный Совет по транспорту в Госдуме РФ (<https://votum.ru/about>).

Исследования специалистов НПЦ «Кропус»

Компанию «Кропус», созданную в 1989 г. на базе ведущего отдела НК структурного подразделения Федерального научно-производственного центра «Прибор», специализировавшегося на автоматизированном контроле качества специальных изделий и военной техники, возглавляет генеральный директор Вячеслав Владимирович Борисенко.

В кооперации с партнерами специалистами НПЦ «Кропус» разрабатывается ряд специализированных систем неразрушающего контроля – системы контроля корпусов атомных реакторов, диагностики подземных металлоконструкций, различных специализированных изделий космической и военной отрасли и др. За последние 10 лет практически полностью были переоснащены несколько цехов на Машиностроительном заводе в г. Электросталь и Чепецком механическом заводе, Заводе им. Серго в г. Зеленый Дол, на заводах ПАО «ТМК». Несколько десятков установок контроля композитных изделий поставлено на ОКБ «Союз», г. Казань, в Федеральный центр двойных технологий, РКЦ «Прогресс», МКБ «Искра», ЦНИИСМ, АО «Авангард», ПО «Стрела», ГРЦ им. В.П. Макеева и др. В области мобильных комплексов контроля выполнен проект по организации серийного производства промышленных мобильных сканеров-дефектоскопов, предназначенных для контроля сварных соединений.

Большое внимание уделяется метрологическому обеспечению создаваемых средств. Более 10 лет компания имеет аккредитацию при Ростехрегулировании на право проведения собственных метрологических работ. Постоянно совершенствуется система менеджмента качества, компания успешно прошла очередной ресертификационный аудит в международном Bureau Veritas на соответствие новейшим требованиям ISO 9001:2015. В 2018 г. компания успешно прошла аудит АО «РосНИТИ» и включена в реестр одобренных поставщиков ПАО «ТМК».

В структуре компании имеется патентный отдел, важная часть разработок защищена патентами РФ на изобретения и промышленные образцы. За успехи в создании приборов и систем ультразвукового контроля коллектив компании «Кропус» неоднократно награждался дипломами российских выставок и конкурсов (<http://www.kropus.com/company/>).

Заключение

1. На рубеже XX и XXI вв. в ультразвуковую дефектоскопию пришли молодые перспективные ученые – лидеры в области исследования и разработки новых методов и аппаратуры, основанных на достижениях физической акустики, физики твердого тела, лазерной оптоакустики, статистической радиотехники, электроники, возникли новые центры исследований с использованием аппарата математической физики, современных методов компьютерного программирования и создания информационных и интеллектуальных технологий акустической диагностики.
2. В течение этого периода времени были исследованы методы помехоустойчивого ультразвукового контроля, в которых используются линейная оптимальная фильтрация, синхронное детектирование, корреляционная обработка сигналов, что позволило уверенно контролировать как полимерные композиционные материалы, так и сложноструктурные бетоны и металлы, разработаны методы и аппаратура ультразвукового контроля параметров жидких сред.
3. Внесен существенный вклад в развитие теории дифракции ультразвуковых волн в твердом теле, разработаны новые принципы и алгоритмы получения изображений дефектов, когерентная ультразвуковая голография, позволившие создать уникальные автоматизированные комплексы, исключая влияние субъективного фактора на результаты контроля и перейти к дефектометрии.
4. Исследованы ультразвуковые методы, разработаны инновационные многофункциональные комплексы НК и ТД железнодорожной инфраструктуры, что обеспечило лидирующее положение российских предприятий в оснащении отечественных железных дорог и метрополитенов современными средствами диагностики и выйти на мировой рынок средств НК и ТД.

5. Разработана теория взаимодействия импульсных лазерных, электромагнитных и акустических полей в ферромагнитных металлах, находящихся при температуре магнитного фазового перехода (точка Кюри), и созданы высокоскоростные методы и средства бесконтактного ультразвукового контроля качества металлоизделий.
6. Предложен и исследован лазерно-ультразвуковой метод дефектоскопии и структуроскопии на основе применения оптико-акустических преобразователей, обеспечивающих возможность проведения прецизионного контроля углепластиковых композитов, измерения остаточных напряжений в металлических конструкциях и сварных швах, измерения упругих модулей твердых тел.
7. На базе информационных технологий и корреляционных методов обработки акустических сигналов с антенными системами и малоапертурными преобразователями предложен и исследован метод цифровой фокусировки антенной решетки, широко использованный при создании технологии и приборов ультразвукового томографического контроля.
8. Получили дальнейшее развитие импедансный метод и средства контроля многослойных конструкций, в числе которых цифровые дефектоскопы и роботизированные комплексы неразрушающего контроля.

От автора

Первый шаг в мир ультразвука я сделал 26 мая 1960 г., пройдя через проходную завода «Электроточприбор» в Кишиневе. С тех пор я занимаюсь ультразвуком и благодарю за помощь и сотрудничество моих учителей – д-ра техн. наук, проф. И.Н. Ермолова, д-ра техн. наук, проф. А.К. Гурвича, акад. РАН, д-ра техн. наук, проф., В.В. Клюева, акад. РАН, д-ра техн. наук, проф. Н.П. Алешина, д-ра техн. наук Ю.В. Ланге, моих соратников – д-ра техн. наук, проф. В.Г. Щербинского, д-ра техн. наук А.А. Самокрутова, д-ра техн. наук В.Г. Шевалдыкина, д-ра техн. наук В.М. Бобренко, д-ра техн. наук, проф. А.Х. Вopilкина, д-ра техн. наук А.А. Ткаченко, д-ра техн. наук В.А. Чуприна, канд. техн. наук В.Ф. Тарабрина и многих других...

Перечень изобретений, собранных автором статьи, представлен на сайте:
http://idspektr.ru/download/UT_patent.pdf



В.В. Борисенко