

# ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИРОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

А. И. ГЕРАСИМОВ

Государственный комитет обороны СССР издал 28.09.1942 распоряжение «Об организации работ по урану», положившее начало развитию исследований по атомной энергии в СССР. Распоряжение предписывало создать при АН СССР «специальную лабораторию атомного ядра (Лабораторию № 2) для координации работ по атомному проекту». И. В. Курчатов (академик с 1943 г.) назначается 10.03.1943 начальником Лаборатории № 2 (ныне РНЦ «Курчатовский институт»). А уже после Отечественной войны издается 08.09.1945 решение технического совета Специального комитета о создании Лаборатории № 3 (ныне ИТЭФ, г. Москва) по разработке реакторов на тяжелой воде. «А где же Лаборатория № 1?» — спросит читатель. По-видимому, нумерация лабораторий не по порядку была принята первоначально специально для запутывания зарубежных разведчиков и шпионов. Тем не менее, 02.03.1946 выпускается Постановление Совета Народных Комиссаров (СНК) «Об организации Лаборатории № 1 при Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ) АН УССР». Ее начальником назначается профессор К. Д. Синельников. Первыми задачами этой лаборатории являлись исследования эффективного сечения урана-235 нейтронами средних энергий (до 1 МэВ); исследования отражений различными веществами нейтронов средних энергий (применительно к оболочкам); разработка мощных ионных источников для целей изотопического разделения тяжелых элементов (в частности, урана); разработка теории цепных реакций на быстрых нейтронах; расчеты по установлению критических размеров котлов (ядерных реакторов).

По мере развертывания в Лаборатории № 1 исследований комплекс решаемых задач начал сильно расширяться, особенно по созданию разного типа ускорителей заряженных частиц. Дело в том, что в ХФТИ разработкой высоковольтной



Владимир Тарасович Толоч,  
член-корреспондент АН УССР

технологии по ускорительной тематике стали заниматься еще с 1931 г., в том числе применительно к линейным резонансным (высокочастотным) ускорителям. Поэтому с 1946 г. по этому направлению исследований была спроектирована и создана серия ускорителей протонов и электронов.

Следует отметить, что назначение К. Д. Синельникова директором Лаборатории № 1 произошло, по-видимому, не без влияния И. В. Курчатова. Синельников с 1920 г. начал учиться на физико-математическом факультете Крымского университета. Тут он познакомился с И. В. Курчатовым — студентом того же факультета. Они стали друзьями. В тяжелые голодные годы (1920–1921) подрабатывали вместе: Синельников — контролером в кинотеатре «Лотос», Кур-

чатов — там же ночным сторожем. С 1924 г. Синельников работает у Иоффе в Ленинградской физико-технической лаборатории. В 1925 г. сюда же приезжает Курчатов, начинает работать тоже у Иоффе, живет у своего друга Синельникова и женится в 1927 г. на его сестре. Друзья становятся родственниками. Они интенсивно занимаются исследованиями, опубликовывают серию совместных работ. Вернувшись в 1930 г. из двухгодичной научной стажировки в Кавендишской лаборатории (Англия), Синельников принимает предложение переехать в Харьков, где создается новый институт. В 1944 г. член-корреспондент АН УССР Синельников (академик с 1948 г.) назначен директором ХФТИ.

Для создания ядерного заряда теоретикам, экспериментаторам и конструкторам КБ-11 (ныне — РФЯЦ-ВНИИЭФ) необходимо было знать давления, возникающие при детонации мощных взрывчатых веществ (ВВ). Не менее важным было определение плотности металлов при импульсном воздействии на них таких давлений, способных в миллионные доли секунды переводить делящиеся материалы в сверхкритическое состояние. Началось также изучение ударной сжимаемости конструкционных материалов. Наиболее наглядную и прямую информацию о таких процессах давала импульсная рентгенография, схема импульсного рентгенографирования взрывного процесса приведена на рис. 1. Получаемые рентгеновские фотоснимки позволяли «увидеть» размеры и взаимное положение металлических деталей в любой момент их сжатия, в том числе и максимального, при давлении в миллионы атмосфер.

Разработка генераторов импульсного рентгеновского (тормозного) излучения проводилась в КБ-11 с 1947 г. под руководством В. А. Цукермана (доктор технических наук с 1954 г.). Для этих целей на основе ускорителей прямого действия разрабатывались импульсные источники пучков электронов. При их прохождении через мишень из тяжелого вещества ( $W, Ta$ ) кинетическая энергия частиц трансформировалась в рентгеновское излучение. Максимальная энергия электронов достигала 2 МэВ. Но этого было мало для увеличения толщины просвечиваемых материалов и повышения точности исследований, и А. И. Павловский (академик с 1992 г.) предложил в 1954 г. использовать для этих целей безжелезные сильноточные бетатроны с энергией ускорения до 100 МэВ. Начались исследования возможностей их создания. Ю. Б. Харитон, который был хорошо знаком с К. Д. Синельниковым, директором Лаборатории № 1 в Харькове, обратился в 1955 г. к нему, при поддержке И. В. Курчатова, с просьбой разработать для КБ-11 высокочастотный ускоритель с импульсным током пучка электронов 1 А и их энергией 5 МэВ. Этот ток превышал в 10 раз максимально достигнутый харьковчанами к тому времени уровень.

К. Д. Синельников предложил возглавить разработку ускорителя для КБ-11 и форсированно вести ее выпускнику ХГУ 1951 г. Владимиру Тарасовичу Толоку, который уже имел опыт практической работы в современной физической лаборатории в группе Л. И. Болотина, наладки инжектора протонов ускорителя на энергию

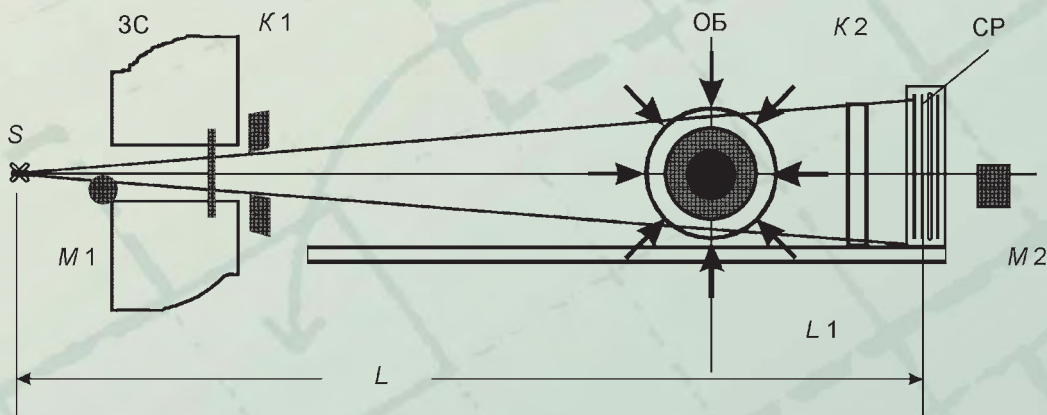


Рис. 1. Схема импульсного рентгенографирования взрывного процесса: S — источник направленного импульсного рентгеновского излучения, ЗС — защитное сооружение, М1-2 — детекторы излучения, К1-2 — коллиматоры излучения, ОБ — соосные трубы, СР — система регистрации (рентгеновская пленка с усиливающим экраном в защитной металлической кассете),  $\nu$  — направление воздействия ВВ при его подрыве

5 МэВ и самостоятельной работы на ускорителе в целом. В. Т. Толок о прожитом вообще и о работе в ХФТИ, в том числе о периоде создания ускорителя ЛУЭ-5 «для Харитона», написал две книги: «Физика и Харьков» (Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2005) и «Жизнь моя...» (Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2006). В дальнейшем мой рассказ будет опираться на эти малоизвестные в России книги.

В 1951 г. лаборатории, где работал В. Т. Толок, стало известно, что «сверху» получено задание разработать, изготовить и отладить какой-то необычный ускоритель. Работа совершенно секретная и очень срочная. Имя заказчика разработчикам не объявили, но они догадывались, что это одна из так называемых «контор». Степень закрытости «конторы» поражала любое воображение. Тогда прошел слух — работа «для Харитона». Вскоре выяснилось, что это вовсе не имя, а фамилия — Харитон Юлий Борисович — разработчик атомных и водородных бомб!

Задача была не просто интересной — захватывающей. Требования по параметрам — сверхжесткими. Не менее жесткими оказались и условия по фокусировке пучка, ширине его энергетического спектра. Необычным было и требование по длительности импульса тока — десятая часть миллионной доли секунды ( $10^{-7}$  с). В научной литературе никаких сведений о чем-либо похожем на такой ускоритель не было. Академик К. Д. Синельников предложил использовать опыт работы института с ускорителями тяжелых частиц (протонов).

Новый ускоритель получил название ЛУЭ-5. Внешне он походил на слегка укороченный котел паровоза (рис. 2). Внутри, в вакууме, располагались два последовательно «связанных» полых

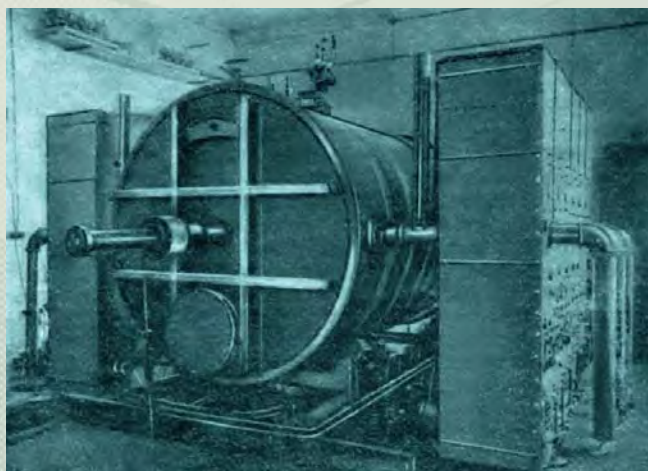


Рис. 2. Линейный ускоритель ЛУЭ-5

медных резонатора в виде шестнадцатигранных призм. В них в импульсах длительностью 400 мс накачивалась энергия от 12 высокочастотных генераторов мощностью 100 кВт каждый, которая ускоряла впрыскиваемые туда из инжектора электроны.

Темпы выполнения специального задания были в духе того напряженного времени. Ускоритель должен был быть источником интенсивного жесткого ионизирующего излучения. Поэтому необходимо было принимать специальные меры по технике безопасности, в частности, соорудить бетонный бункер для биологической защиты окружающей среды. Но времени на это просто не было. Выбрали свободное место во дворе института подальше от других объектов, над выкопанной ямой соответствующих размеров установили «котел» ускорителя с вакуумными насосами и начали его откачку под открытым небом. Потом над всем этим сооружением натянули брезентовый тент от дождя. Пока шла непрерывная вакуумная тренировка, в мастерских спешно изготавливались остальные узлы ускорителя.

С наступлением холодов брезентовый шатер оброс деревянными стенами и настоящей толевой крышей. Изготовлением систем ЛУЭ-5 руководил Л. И. Болотин. Работы по сооружению сложной установки хватало всем: конструкторам, строителям, электрикам, монтажникам. Но вот все узлы собраны, отлажены, теперь очередь за физиками. Остается самая малость — сделать из нагромождения оборудования и приборов ускоритель, не имеющий аналогов в мире. При работе с ускорителем защищать работающих от излучения должна была полутораметровая кирпичная стена. За нею находился пульт управления. Стена была поставлена только с одной стороны ускорителя, в стене узкая амбразура для наблюдения.

Толоку подчинялась небольшая научная группа: молодые физики Виктор Чечкин и Николай Назаров и трое постоянных лаборантов (интеллигентный и изобретательный Виктор Суворов, спокойный, уравновешенный Анатолий Украинский и Анатолий Новгородцев, отчаянный рыбак и охотник). Создание этого уникального ускорителя стало первой серьезной победой маленького коллектива. В результате вместо заданной заводом рекордной силы тока в 1 А было получено 10 А! Превысили задание в 100 раз!

Результат этот дался непросто. Было, например, когда в течение месяца работа оказывалась на грани срыва. Никто не мог помочь, дело новое, да и посещать сверхмощную по излучению уста-

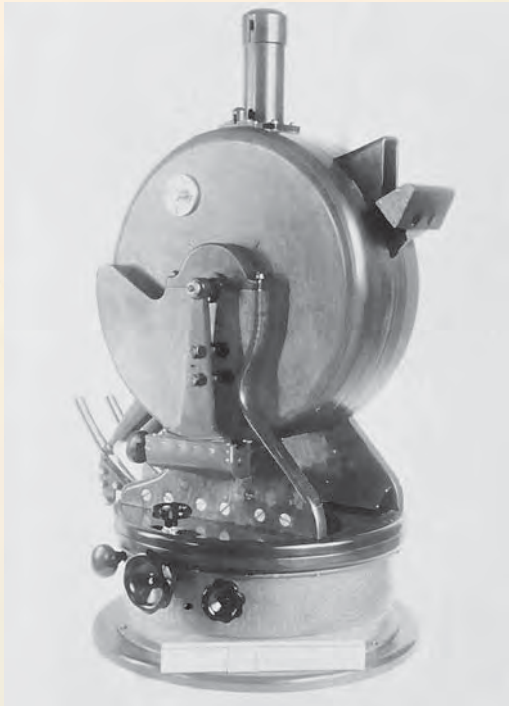


Рис. 3. Безжелезный бетатрон БИМ-3

новку опытные старшие товарищи не спешили. Но случалось и иное настроение, когда радость от выполнения задания толкала лихо отплясывать гопак прямо «на спине» ускорителя.

В ходе работы удалось найти несколько оригинальных и очень простых решений трудных задач. Так, отказавшись от знаменитых тогда дорогих и капризных лантанных катодов, научились получать необычно большие импульсные токи электронов путем импульсного перекаливания плоской спирали — катода из вольфрамовой проволоки — до температуры, близкой к плавлению вольфрама. Установили возможность эффективной «автоматической» фокусировки пучка электронов уже в первом ускоряющем зазоре вследствие того, что электроны в нем успевали набрать скорость, близкую к скорости света, и на них уже не могла влиять дефокусирующая конфигурация электрического поля на выходе из зазора. Не понадобилось использовать какие-либо специальные фокусирующие устройства. Конфигурация ускоряющего электрического поля напоминала линзу, выпуклую на входе и плоскую на выходе электронов.

Вначале было много хлопот с обеспечением синхронной работы 12 высокочастотных генераторов. Вели они себя подобно стаду диких мустангов. Настроенные, казалось бы, на одну частоту колебаний, они мешали друг другу, никак

не хотели суммировать общую мощность в резонаторах. Добились этого только увлечением всех генераторов на частоту одного из них — «лидера», которого они «выбирали» сами.

Когда работа шла хорошо, работники безвылазно «сидели» на установке, благо жили рядом с институтом. В такой ситуации удавалось успевать многое. Рабочий день Толока начинался в 9 часов. К этому времени лаборанты успевали откачать воздух из резонаторов до нужного разрежения. Работа до обеда, затем короткий перерыв, продолжение экспериментов до 17–18 часов. После можно было тут же, во дворе института, сыграть в волейбол с соседним отделом. Часов с 20 — снова работа, а далее — как получится, часто и до полуночи. В вечернее время было лучше всего вести измерения: электросеть не «качается», телефоны молчат, лаборанты отпущены. Когда же ускоритель заработал на полную мощность, то его обходили стороной уже и в рабочее время. Серьезным предостережением был далеко видный красный фонарь (повод для очень «тонких» шуток), вывешиваемый на входе.

Кирилл Дмитриевич Синельников следил за успехами в своеобразной манере. Он не любил выходить из своего кабинета, но ему, чтобы знать положение дел, и не нужно было этого делать. Когда сообщили, что получены, наконец, электроны с необходимой энергией 5 МэВ при хорошей фокусировке, он дал большой кристалл каменной соли и попросил подставить его под электронный пучок. «Выстрелили» один раз, Синельников взглянул на кристалл и сказал: «Да, 5 МэВ, и фокусировка отличная. Поздравляю». В месте попадания пучка электронов соль почернела на некоторую глубину, по ней Кирилл Дмитриевич и оценил энергию. Он по опыту знал, что глубина почернения 2 мм соответствует примерно 1 МэВ. На кристалле почернение достигало 10 мм, а фокусировка была определена по черному пятну диаметром около 3 мм на поверхности соли.

Работа шла к концу. Были сняты зависимости параметров ускоренного пучка от различных факторов, показаны широкие возможности разработанной ускоряющей системы, в частности, создания ускорителей с большими токами электронов на энергию 100 МэВ и выше. Подоспела и теория, обосновавшая успех. Создал ее теоретик Николай Хижняк.

Самым тщательным образом была снята карта пространственного распределения полей тормозного излучения. Его интенсивность была впечатляющей — две с половиной тысячи рентген вдоль оси на выходе ускорителя. Излучение ге-

нерировалось при торможении пучка электронов на танталовой мишени. Поток излучения благодаря отличной фокусировке электронов имел узкую направленность.

Можно было досрочно сдавать ЛУЭ-5 заказчику. Но, сэкономив время, решили провести еще серию экспериментов, связанных не с самим ускорителем, а с использованием его «способностей» по назначению. К тому времени разработчики уже догадались, для чего был нужен такой ускоритель.

Надо полагать, что разработчики достаточно хорошо обосновались в своей «временке», так как в ней стали появляться мыши. Кому-то пришла жестокая мысль провести «биологический эксперимент». Одну пару мышей поместили на выходе пучка электронов, где интенсивность излучения была самой высокой и жесткой, другую — в стороне от оси, где оно было слабее и «мягче». Результат нас удивил: «мягкое» излучение убило мышей в тот же день, а попавшие в самое «жесткое», не задерживающееся в тканях, продолжали жить. Этим мышам отпустили, уступив угрызениям совести.

Перед расставанием с дорогой «игрушкой» решили продемонстрировать заказчику предельно понятный любому «генеральский эффект». Решили, что лучшим быстрым объектом съемки может послужить летящая пуля. Скорость у нее приличная — 865 м/с (для боевой винтовки). Пулю нужно было «ловить» в момент, когда она пролетает между мишенью, в которой тормозится пучок ускоренных электронов, давая вспышку излучения, и рентгеновской пленкой. На пленке должен получаться теневой снимок.

Было сделано множество эффектных снимков. Например, «сфотографированы» две пули: одна спокойно лежащая, другая — в полете. Визуально обе пули выглядели одинаковыми, за время экспозиции тень быстрой пули на снимке не успевала размыться. Однако для получения таких снимков пришлось немало потрудиться. Нужно было поймать быструю пулю в нужном месте в нужный момент. Для этого сделали пулю «включателем» ускорителя, а потом соответствующим образом она синхронизовала и работу всех его систем. Вершиной искусства синхронизации в таких «генеральских забавах» стал снимок разрывной пули внутри стеклянной банки с жидкостью. На снимке были видны контуры банки, жидкость — вода с примесью железной руды (чтобы она была видна в гамма-лучах). Перед пулей, летящей со сверхзвуковой скоростью, уплотнение жидкости. Этот снимок уникален и он единственный. Причина — слишком уж «генеральским» получился эффект на деле:

громкий выстрел винтовки, не менее громкий взрыв. Поток кровавой жидкости с потолка! Казалось бы, учли предварительно все: обложили банку небольшими ящиками с железной рудой и свинцовыми кирпичами, но сверху все это накрыли просто листом фанеры. Пуля «взорвала» жидкость, и взрыв пошел вверх! Струя жидкости кровавого цвета (воду окрасила руда) ударила в потолок. От банки осталась стеклянная пыль. Забыли про гидравлический удар!

На ученом совете института академик К. Д. Синельников поздравил разработчиков с мировым рекордом по силе тока в резонансных ускорителях. По результатам этих исследований и разработок В. Т. Толок вскоре защитил кандидатскую диссертацию, его научным руководителем был Кирилл Дмитриевич. (Полагающуюся за создание ЛУЭ-5 премию в 200 тысяч рублей разработчики не получили. По словам Толока, ХФТИ великодушно отказался от нее. Может, так оно и было. Разработчики не заинтересовались. Воспитание не позволило. Посочувствовали все только Виктору Чечкину, который собирался на премиальные купить себе штаны вместо заношенных тренировочных, в которых ходил на работу).

У Толока об этом ускорителе-рекордсмене осталась своеобразная память на всю оставшуюся жизнь. Через пару месяцев после отправки ускорителя заказчику на первых трех пальцах обеих рук появились твердые сухие волдыри. Боли усиливались, кончики пальцев опухли, приобрели розовато-фиолетовый цвет. Указательный палец левой руки начал чернеть. Время шло, а наша медицина не помогала. Наконец, опасаясь гангрены, институт направил Толока в Москву, в Институт биофизики Академии наук СССР. Вадим Николаевич Петушков — профессор и главный хирург клиники объявил: «Ампутация и немедленно. Сначала фалангу одного пальца, а потом посмотрим. Кстати, по клиническим показаниям у Вас на пальчиках более двух тысяч рентген, так как начался некроз (омертвление) тканей. Эта доза равна от четырех до шести летальных при общем облучении».

Каким-то образом кончики пальцев обеих рук попали под поток тормозного излучения, и только отличная фокусировка пучка электронов спасла от смертельного общего облучения. Некроз тканей начинается при интенсивности облучения свыше двух тысяч рентген. Это полностью соответствует дозе, измеренной в месте торможения тонкого пучка электронов на мишени. Мишень приходилось менять. Она невелика — танталовый диск 20 мм в диаметре, взять ее можно было только

кончиками пальцев. Очевидно, ускоритель сработал при замене мишени. Он был подготовлен для запуска от пули, пуля закорачивала тонкие фольги, которые могли замкнуться и сами по себе от неосторожного движения. К счастью, облучение было локальным. По карте распределения излучения было понятно, что общее облучение было около двухсот рентген. Это все же раза в два-три меньше средней летальной дозы.

Официально В. Т. Толок был направлен в обычную научную командировку. Даже были соответствующие бумаги, например, командировочное предписание, чем там заниматься. Платили и командировочные — 50 рублей в день. Командировки, как положено, выписывались на месяц и присылались новые, когда срок предыдущих кончался. В течение 1956–1957 гг. пришлось побывать в таких своеобразных командировках четыре раза: процесс продолжался и пальцы очень медленно заживали. Эти командировки означали, что факту несчастного случая был присвоен гриф «секретно», чтобы не портить реноме института. Только через 37 лет в 1994 г. из архива секретного отдела института было извлечено официальное заключение Института биофизики 1957 г., и Толоку стал известен диагноз: «лучевое поражение кистей обеих рук с превышением порога некроза в результате несчастного случая на производстве». Через много лет его заболевание признали профессиональным и установили ему инвалидность 2-й группы.

Ускоритель ЛУЭ-5 был перевезен в КБ-11, налажен и введен в 1956 г. в эксплуатацию. Использовался до 1965 г. в опытах по регистрации быстройпротекающих процессов, проводимых в газодинамическом отделении (ныне Институт физики взрыва, ИФВ) коллективом во главе с Диодором Михайловичем Тарасовым (доктор технических наук с 1963 г.). ЛУЭ-5 сразу позволил получить серию новых важных результатов. Так как автор статьи участвовал с 1955 г. в разработках под руководством А. И. Павловского безжелезных бетатронов для таких же целей, будущих конкурентов для ЛУЭ-5, то мы ревностно следили за результатами его применений в экспериментах. После ввода в практику газодинамических исследований в 1959 г. первой бетатронной установки БИМ-3 стали видны ее большие преимущества по сравнению с ЛУЭ-5. В связи с этим он был выведен из эксплуатации и в 1965 г. демонтирован. Свою значительную роль он сыграл.

Первая публикация об ускорителе ЛУЭ-5 «Сильноточный ускоритель электронов» появи-

лась в журнале «Атомная энергия» в 1961 г. (Т. 11, № 1, с. 41–45), авторы — В. Т. Толок, Л. И. Болотин, В. В. Чечкин, Н. Н. Назаров, Н. А. Хижняк, — непосредственные участники создания ускорителя. Обращает внимание отсутствие в авторах К. Д. Синельникова, бывшего научным руководителем данной работы и руководителем кандидатской диссертации В. Т. Толока. Это подчеркивает принципиальность ученых старой школы (И. В. Курчатова, Ю. Б. Харитон и др.) в отношении соавторства.

В. Т. Толок в дальнейшем занимался исследованиями, связанными с возможностями разработки управляемых термоядерных реакторов, созданием экспериментальных стеллараторных и торсионных установок «Снег», «Украина», «Ураган» и др., исследованием и внедрением в промышленность обнаруженного эффекта — конденсации атомов дуговой плазмы на более холодную, чем у катода, поверхность и бомбардировки ее ионами (метод КИБ). Оборудование, в основе работы которого лежит этот эффект, выпускалось промышленно и позволяло создавать прочные механические покрытия на металлах, в частности, увеличивать износостойкость отрезных резцов в десять раз. Толок защитил докторскую диссертацию, стал профессором, член-корреспондентом АН УССР в 1972 г., первым заместителем директора ХФТИ.

### Литература

1. Ранюк Ю. Н. Лаборатория № 1. — Харьков: АКТА, 2006.
2. Круглов А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1994.
3. Цукерман В. А., Азарх З. М. Люди и взрывы. — Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1994.
4. Герасимов А. И., Куропаткин Ю. П., Тарасов А. Д. Безжелезные бетатроны — генераторы коротких импульсов излучения для рентгенографии быстропротекающих процессов // АТОМ. 1996. № 2. С. 32–37.
5. Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов. Сборник научных трудов/ Под ред. Н. Г. Макеева. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.

**ГЕРАСИМОВ Анатолий Иванович** —  
ведущий научный сотрудник ИЯРФ  
РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук,  
лауреат Ленинской премии