

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

© 2019 г. А. П. Черняев*, С. М. Варзарь,
А. В. Белоусов, М. В. Желтоножская, Е. Н. Лыкова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.; после доработки 25.12.2018 г.; принята к публикации 25.12.2018 г.

В настоящей работе обсуждается роль радиационных технологий в мировом хозяйстве: фундаментальной науке, промышленности, сельском хозяйстве и медицине. Сравняется развитие радиационных технологий в мире и России. Общее количество источников ионизирующих излучений в мире насчитывает примерно 11 млн единиц, основную часть которых составляют радиоактивные источники (~6–7 млн единиц) и рентгеновские установки (~4 млн единиц). Число высокотехнологичных установок (ускорителей, разных типов томографов и других установок), использующих ионизирующие излучения, не превышает 200 тыс. единиц. В России — более 153 тыс. единиц таких приборов и установок, в том числе использующих рентгеновское излучение порядка 64700 единиц, радиоизотопных приборов и установок, реакторов, хранилищ радиоактивных отходов около 79700, ускорителей — 471. В статье дается анализ стратегически и экономически наиболее перспективных направлений развития радиационных технологий в России.

DOI: 10.1134/S004400271904007X

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование строения вещества привело к нескольким фундаментальным открытиям, ставшим базой всей современной радиационной физики. Это в первую очередь — катодные лучи, обнаруженные Ю. Плюккером в 1859 г., затем рентгеновское излучение (В. Рентген, 1895 г.), а также радиоактивность некоторых видов вещества (А. Беккерель, 1896 г.). Четвертым событием в этом ряду стало создание специальных установок — ускорителей — для получения ионизирующих излучений в конце двадцатых—начале тридцатых годов прошлого столетия. С этого времени началось использование ионизирующих излучений.

На первом этапе (наиболее обширном) развития радиационных технологий (1895–1970 гг.) в основном осуществлялись исследовательские работы, проводилось накопление экспериментального материала и его теоретическое осмысление. Первую рентгеновскую установку в России построил известный ученый А. С. Попов. Она была использована для получения первых снимков костей человека, что в дальнейшем позволило определять места переломов и нахождения осколков и пуль в теле человека и спасать большое количество жизней. Во время Русско-японской войны рентгеновские установки стояли на флагманском корабле “Аврора”.

Радиационная онкология и лучевая терапия в России возникли, когда Мария и Пьер Кюри подарили директору онкологического института несколько радиевых игл. Этот институт был открыт по инициативе профессора московского университета Л. Левшина в 1903 г. на пожертвования промышленников Морозовых. В 1922 г. с приходом на должность директора П. Герцена онкологический институт был объединен с пропедевтической хирургической клиникой Московского университета, а уже с 1934 г. стал учреждением Министерства здравоохранения. В 1918 г. в России была создана первая рентгенологическая клиника.

До тридцатых годов прошлого века ионизирующие излучения получали с помощью рентгеновских трубок и из естественных источников. На рубеже двадцатых—тридцатых годов были созданы новые виды источников ионизирующих излучений — ускорители заряженных частиц, а затем на них были получены и искусственные изотопы.

Вторым шагом на этом этапе стало начало промышленного применения ионизирующих излучений. Так, рентгеноструктурный анализ появился в результате выдвинутой в 1912 г. М. фон Лауэ идеи — при помощи X-лучей исследовать внутреннее строение кристалла. Сначала получали снимки, описывающие строение монокристалла, затем стали обнаруживать дефекты решетки. Далее стали изучать поликристаллические материалы —

*E-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru

порошки, сплавы. Рентгеновские лучи и радиоактивные источники эффективно применялись для определения внутренних дефектов изделий (трещин, раковин, непроваров, включений), т.е. возникла рентгено- и гамма-дефектоскопия.

Третьим шагом стало применение ионизирующих излучений в биологии. С 1895 по 1922 гг. благодаря обширным исследованиям сформировалась наука радиобиология. Было открыто торможение клеточного деления при облучении (М. Корнике и др., 1905 г.), а в 1906 г. французские ученые И. Бергонье и Л. Трибондо обнаружили различные реакции клеток на облучение. В 1930-е гг. английские ученые Д. Бернал и Д. Кроуфут-Ходжкин осуществили рентгеноструктурный анализ белков, позволивший построить в 1953 г. первую пространственную модель ДНК. Ионизирующие излучения начали использовать не только в научных исследованиях, но и в различных отраслях мирового хозяйства. Они прочно вошли в жизнь и стали неотъемлемой частью многих технологических процессов. Число направлений, в которых применялись радиационные технологии, росло с каждым годом [1–7].

В тридцатые–сороковые годы прошлого столетия в мировом хозяйстве началось применение ускорителей заряженных частиц и искусственных радиоактивных изотопов. К пятидесятым годам сформировалось представление о действии ионизирующих излучений на живую и неживую материю. Появились первые пилотные технологические процессы с использованием источников ионизирующих излучений. Они со временем совершенствовались и стали внедряться в промышленные цепочки.

На **втором этапе** (1970–2010 гг.) началось внедрение в различные отрасли народного хозяйства ядерных технологий. Потребность в них возрастала с каждым годом, а экономическая выгода их использования была все более заметной. Особенно значительными были успехи радиационных технологий в химии и микроэлектронике, медицинской технике, сельском хозяйстве и стерилизации медицинской продукции. Начала формироваться законодательная база использования различных достижений в радиационных технологиях. Набрала оплот в своем развитии атомная энергетика.

Радиационные технологии от отдельных проектов перешли к широкому промышленному использованию, став неотъемлемой частью мировой экономики. Их вклад в общемировой валовый продукт становился все более существенным и с каждым годом продолжал возрастать. Они проникли во все новые отрасли мирового хозяйства, улучшая качество продукции и увеличивая производительность труда, создавая новые отрасли и материалы. Примерно с 2000 г. возрастающими темпами

росло число источников ионизирующих излучений, используемых в различных отраслях мирового хозяйства. Сложилась международная норма по использованию радиационных технологий.

На **третьем этапе** (условно с 2010 г.) внедрение радиационных технологий началось в большом числе стран. Ежегодно в мировое хозяйство поступает сотни тысяч источников ионизирующих излучений. Они в значительной степени заменили действующие на более совершенные и увеличили их общее число. К тому же возросло число модификаций техники для разных направлений использования. Получили широкое внедрение радиационные технологии в большом числе отраслей промышленности и сельского хозяйства, появились новые отрасли мирового хозяйства. Темпы развития ядерно-физических методов в медицине стали настолько впечатляющими и разнообразными, что сейчас трудно представить развитие высоких технологий в медицине без участия ученых (математиков, физиков, химиков и биологов). Атомная энергетика с каждым годом охватывает все большую территорию планеты при значительном увеличении надежности энергоблоков. Продолжают совершенствоваться международные нормы по применению радиационных технологий в разных сферах мирового хозяйства.

Использование радиационных технологий последние десятилетия интенсифицировалось по всем направлениям. В 2017 г. во всем мире одной только промышленной продукции с их использованием произведено более чем на 650 млрд долл. Учитывая создание техники, использующей ионизирующие излучения, которой ежегодно выпускают на сумму порядка 500 млрд долл., а также внедрение радиационных технологий в решение экологических проблем, медицинские услуги и сельскохозяйственное производство, эта цифра превышает 1 трлн долл. К 500 млрд долл. приближается доход от товаров и услуг ядерной медицины.

В различных отраслях мирового хозяйства действуют промышленные рентгеновские установки, радионуклидные источники и рентгеновские медицинские приборы (диагностические и терапевтические аппараты), промышленные и медицинские ускорители заряженных частиц, хранилища радиоактивных отходов и ядерного топлива, ядерные реакторы, технологии ядерной химии для модификации материалов и создания новых, а также многие другие устройства и технологии. Количество направлений использования радиационных технологий ежегодно увеличивается на ~10–15%.

В этой связи весьма актуальным представляется анализ тенденций развития радиационных технологий в разных отраслях народного хозяйства



Рис. 1. Приборы для радиационных технологий в мире.

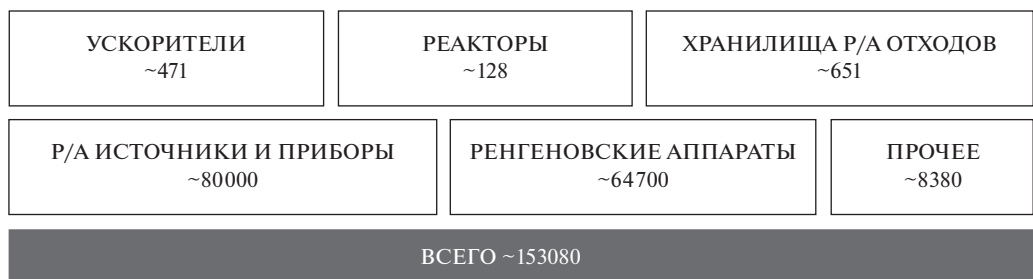


Рис. 2. Приборы для радиационных технологий в России.

России, хотя бы в самых общих чертах, оценка количества и качества радиационных установок, использующих различные источники ионизирующих излучений, в сравнении с аналогичными в ведущих странах мира. Это позволит установить отрасли и технологии, в которых наша страна отстает от ведущих стран мира, а также определить направления, где мы занимаем или можем занять лидирующие направления.

2. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИРЕ И РОССИИ

В современном мире примерно 10–11 млн установок, приборов, устройств, использующих ионизирующие излучения (рис. 1). К источникам ионизирующих излучений относятся приборы, оборудование, использующие рентгеновское излучение, искусственные и естественные радиоактивные изотопы, а также ускорители заряженных частиц. Основную часть составляют рентгеновские приборы и различные типы источников с радиоактивными изотопами — соответственно ~36% и ~62%. Количество остальной техники, создающей и использующей ионизирующие излучения, существенно меньше (~2%), но эта техника чрезвычайно высокотехнологична и очень дорогостоящая (конечно, о стоимости реакторов речь даже не идет). Одних приборов для лучевой диагностики действует более 94 тыс. Они включают в себя более 40 тыс. компьютерных и 30 тыс. магнитно-резонансных

томографов, а также 19 тыс. ОФЭКТ и гамма-камер, 4 тыс. ПЭТ-сканеров.

В народном хозяйстве нашей страны на 1 января 2017 г. использовалось всего 153 080 источников ионизирующих излучений [8] (рис. 2, нижняя строка). Причем они располагаются в различных организациях и учреждениях: АЭС, геологических и добывающих предприятиях, медицинских, научных, учебных, промышленных и таможенных учреждениях, пунктах захоронения радиоактивных веществ.

В России приборов, установок и комплексов, использующих рентгеновское излучение [8] ~64700 единиц (42.2%), а естественные и искусственные радиоактивные изотопы ~80 000 (52.2%). В их числе дефектоскопы, содержащие радионуклидные гамма-источники, — 1300, закрытые радионуклидные источники — 61 800, радиоизотопные приборы и установки — 14.9 тыс. В нашей стране 128 ядерных реакторов, 651 хранилище радиоактивных веществ и отходов ядерных реакторов, 471 (0.3%) ускоритель заряженных частиц, 389 ускорителей электронов и 82 — протонов и ионов.

Таким образом, соотношение техники на основе ионизирующих излучений выглядит у нас так: приборы, устройства, отдельные источники, использующие радиоактивные изотопы — 53.6%, рентгеновская техника — 40%, сложная техника (ускорители и реакторы) — 0.4%, другое — 6.0%. В мире

доля ускорителей и реакторов примерно такая же, как и у нас в стране — $\sim 0.4\%$.

2.1. Рентгеновское излучение

Как уже отмечалось выше, рентгеновские установки, в первую очередь, вошли в медицину, так что сегодня вряд ли можно представить любое медицинское учреждение без наличия в нем хотя бы нескольких рентгеновских аппаратов. Они активно применяются не только в диагностике, но и в терапии. Рентгеновское исследование позволяет уточнить форму органов, их положение, тонус, перистальтику, состояние рельефа слизистой оболочки, а также произвести терапевтическое лечение и даже провести операцию. Рентгеновские установки изготавливают около ста компаний многих стран мира. Ежегодно производится более 200 тыс. рентгеновских приборов и установок. В России покупается ежегодно более 10 тыс. рентгеновских приборов, что в целом обеспечивает потребности народного хозяйства [9, 10]. Полтора десятка производителей поставляет на внутренний рынок более 5 тыс. единиц рентгеновской техники, в том числе для медицины 4.4 тыс.

В науке с помощью рентгеновских лучей было сделано много важнейших открытий, как, например, дифракция X-лучей кристаллами (Лауэ, 1914), анализ кристаллической структуры и состава вещества (Брэгг, 1915). Множество открытий на базе рентгеновских лучей сделано в физике атома, астрофизике и физике космоса, в радиобиологии и т.д.

Их использование в промышленности привело к созданию и успешному развитию неразрушающего контроля, который применяется в производстве и эксплуатации (в том числе и в целях безопасности).

Мировой рынок неразрушающего контроля в 2013 г. составлял 7.9 млрд долл., а в нашей стране — всего $\sim 1.6\%$ мирового рынка (47.7 млн долл.) по данным корпорации Росатом [11]. В 2018 г. он может достигнуть 11.6 млрд долл., а рынок досмотровых систем — 2.5 млрд долл. При неразрушающем контроле последние десятилетия существенно выросло пространственное разрешение, контрастность изображения, увеличилась надежность установок и толщина материала, контролируемая на них, а также сократилось время получения изображения. Развитие досмотровых систем снижает риск терактов, увеличивает возможности обнаружения взрывчатых и радиоактивных веществ, ускоряет досмотр.

В народном хозяйстве нашей страны особенно много работает рентгеновских установок и радиоактивных источников, в неразрушающем контроле [8–10, 12–17] их 12658, в том числе в дефектоскопии (8675), в досмотровых комплексах (3983).

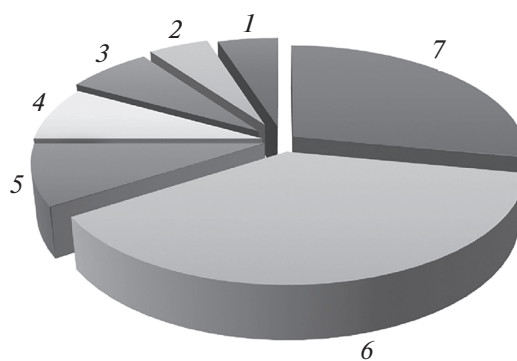


Рис. 3. Рентгеновская диагностическая техника: 1 — аппарат рентгеновский С-дуга, 2 — аппарат рентгеновский передвижной, 3 — маммограф, 4 — флюорограф, 5 — ангиограф, 6 — комплекс рентгенодиагностический, 7 — компьютерный томограф.

Причем на промышленных предприятиях их 7258, в таможенных — 980 (ускорителей 39). Закрытых радиоактивных источников в неразрушающем контроле 12 042, в том числе 926 гамма-установок.

В сельском хозяйстве рентгеновская техника, радиоактивные источники и ускорители электронов применяются в генетике, для стимуляции роста семян, сохранности продукции в сельском хозяйстве (радиационная обработка продуктов и стерилизация), радиационной экологии.

Российский рынок рентгенодиагностического оборудования в XXI в. остается достаточно крупным и динамично развивающимся. Его объем с 2008 г. растет в среднем на 37% в год, и в 2012–2014 гг. составлял 220–245 млрд руб. К настоящему времени отечественная промышленность [12–17] производит практически всю номенклатуру изделий, в том числе и для общей рентгенодиагностики: маммографы, цифровые флюорографы, передвижные кабинеты на шасси автомобилей для цифровой рентгенографии и маммографии, хирургические рентгеновские аппараты типа С-дуга, некоторые виды цифровых преобразователей рентгеновского изображения, а также магнитно-резонансные томографы на постоянных магнитах. На российском рынке рентгеновской диагностической техники соотношение ее различных видов представлено на рис. 3.

Более 60% объема всех закупок медицинского оборудования приходится на рентгенодиагностические комплексы и компьютерные томографы, примерно равные доли имеют ангиографы, флюорографы и маммографы. Оставшаяся часть поделена поровну между такими видами рентгеновских аппаратов, как аппарат рентгеновский С-дуга и аппарат рентгеновский передвижной (рис. 3).



Рис. 4. Ускорители в мировом хозяйстве.

Все компьютерные томографы поставляются из-за рубежа, причем 70% — от основных поставщиков этого оборудования (из США — 35%, из Японии — 18%, из Нидерландов — 13%). Ангиографы также не производят в нашей стране. Их поставляют: США — 34%, Нидерланды — 21%, Япония — 7%. Российские компании поставляют в учреждения здравоохранения значительную долю флюорографов (около 70%), рентгенодиагностических комплексов (~40%), передвижных рентгеновских комплексов (~41%), рентгеновских аппаратов с С-дугой (~30%), а также 24% маммографов. Российское рентгеновское оборудование составляет 26% общего объема в денежном выражении и примерно 44% в количестве единиц. Ведущими производителями, имеющими собственные разработки и производственную базу, являются московские: ЗАО “Амико”, ООО “ПМП “Протон”, ООО “Мосрентгенпром”, “Гелпик”, “СпектрАп”, “Медицинские Технологии”, петербургский ЗАО НИПК “Электрон”.

В России основная доля рентгеновских аппаратов (почти 80%) на 1 января 2017 г. используется в медицинских целях (52 040 единиц). Для сравнения, в 2002 г. в России действовало 36 782 рентгеновских диагностических аппаратов разного назначения.

В среднем по стране в медицине один рентгеновский медицинский аппарат приходится на 3200 жителей, а в Москве и Санкт-Петербурге — на 2000 жителей.

2.2. Ускорители заряженных частиц

Особенно необходимо выделить источники ионизирующего излучения — ускорители заряженных частиц. Эти установки являются одним из уникальных достижений человеческой мысли. Трудно было предположить, что спустя три четверти века после создания они станут играть такую же важную роль в развитии нашей цивилизации, как лазер, ракета, самолет, космический аппарат, т.е. станут одним из величайших достижений человечества. Ускорители стали не только важнейшим инструментом ученых, они стали проникать в различные области народного хозяйства — в промышленность, сельское хозяйство и медицину. Их размеры стали уменьшаться, а характеристики

варьироваться в широких пределах, позволяя решать все более широкий круг задач. В науке появились сложнейшие установки и ускорительные комплексы (синхротроны, коллайдеры, линейные ускорители), позволяющие ускорять частицы до сверхвысоких энергий — сотни ГэВ и даже единицы ТэВ.

В настоящее время ускорители широко используются как в научных исследованиях (в физике, химии, биологии, радиоэкологии и других науках), так и в прикладных областях народного хозяйства — в промышленности, сельском хозяйстве и медицине.

Сложно оценить, какие установки следует считать собственно ускорителями. Ведь ускорение заряженных частиц происходит и в рентгеновской трубке, и в кинескопе, и тем более в электронном микроскопе.

В мире общее количество ускорителей, действующих в науке, промышленности, сельском хозяйстве и медицине, к 2018 г. оценивается примерно в 42 400 единиц [18–26] (рис. 4). Это число не включает в себя ускорители, используемые в закрытых работах, в частности, в оборонной промышленности, а также электронные микроскопы и рентгеновские трубки.

В 210 научных лабораториях и ускорительных центрах примерно 40 стран мира для исследований в ядерной физике и физике частиц используется около 1200 ускорителей, что составляет примерно 3% всех существующих ускорителей [27]. Последние десятилетия темпы внедрения ускорителей в народное хозяйство возрастают, а их число ежегодно увеличивается на 10–15%.

Рынок медицинских и промышленных ускорителей составлял около 4.7 млрд долл. к середине 2017 г., и эта сумма увеличивается более чем на 10% ежегодно. Вся цифровая электроника сейчас зависит от использования пучков частиц для ионной имплантации, что позволяет создать продукции с помощью ускорителей ежегодно на сумму более 1.5 млрд долл. Стоимость продуктов, обработанных на ускорителях, ежегодно составляет более чем 500 млрд долл. [6].

В России развитие ускорительной техники началось почти одновременно с другими ведущими странами мира. Лишь в 1990–2000 гг. их строительство сильно замедлилось, но в последнее время

ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ~7500	ИМПЛАНТАТОРЫ ~11 000	ГЕНЕРАТОРЫ НЕЙТРОНОВ ~2000
ОБЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ~3000	ПРОИЗВОДСТВО ИЗОТОПОВ ~1500	НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АНАЛИЗ ~2000
МИРОВОЕ ХОЗЯЙСТВО ~27000		

Рис. 5. Ускорители в мировой промышленности.

быстро восстанавливается. В нашем народном хозяйстве действует порядка 470 ускорителей. В том числе 181 в медицине [28], 56 в научных и учебных организациях, 236 в народном хозяйстве (включая ускорители в таможах, структурах Росатома и других предприятиях).

В мире существуют около 70 производителей ускорителей. В России их примерно 14, причем наиболее крупные [6, 7] — институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), НИИЭФА (г. Санкт-Петербург) и быстро набирающий темп НИИЯФ МГУ (г. Москва) совместно с предприятием “Торий”.

Как отмечалось выше, примерно 51 или ~4.3% всех ускорителей, работающих в мировой науке, функционируют в научных и учебных заведениях в России. Разделить ускорители, работающие в научных и промышленных целях, достаточно сложно, поскольку часть из них работает в обоих направлениях, а часть располагается в научных учреждениях, но работает полностью в промышленных целях. В частности, в Московском государственном университете в фундаментальных и прикладных исследованиях используется семь ускорителей.

Они применяются для исследований в физике ядра и элементарных частиц при низких (до ~10 МэВ/нуклон) и средних (10 МэВ–1 ГэВ) энергиях. Целый ряд уникальных исследований в области взаимодействия частиц при сверхмалых расстояниях ведется на ускорителях высоких энергий с энергией выше 1 ГэВ [29, 30]. Ускорителей с энергией частиц 1 ГэВ и выше в мире действует порядка 110, в том числе в России — 10 (это в основном источники синхротронного излучения (СИ), ускорители на встречных пучках, протонные синхротроны).

Комплексов со встречными пучками в мире работает семь, причем, в нашей стране действует один такой комплекс в ИЯФ СО РАН.

В мире работает 83 источника СИ в 73 лабораториях [30]. Страны, в которых больше всего таких центров — США (16), Япония (15), Германия (8).

В России таких центров 6 — в ФИАНе, Курчатовском институте, ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), Дубне, Зеленограде, Томске.

В последнее время активно для большого спектра научных и практических задач создаются лазеры на свободных электронах. Их в мире шесть (Германия, США, Япония, Швейцария, Южная Корея, Россия), причем один из них работает в Новосибирске в терагерцовой области излучения.

В мировой промышленности, как уже отмечалось, работает 27000 ускорителей ионов, протонов и электронов [6], а в сельском хозяйстве — 1500.

Общее количество ускорителей, действующих в промышленном производстве, включает в себя около 11 500 ускорителей ионов, менее 3500 ускорителей протонов и 11 500 — электронов. Значительная часть промышленных ускорителей работает в производстве новых материалов посредством имплантации ионов (~11 000) и электронно-лучевой обработке материалов — 7500, в том числе электронная сварка и резка — более 4500 ускорителей (рис. 5). Для неразрушающего анализа и облучения электронным пучком используются ускорители электронов — соответственно 2000 и 3000 единиц.

Ускорителей протонов, используемых для производства изотопов (в том числе и для медицинских целей), и пучков нейтронов соответственно 1500 и 2000 единиц.

В 1984–2017 гг. российские научно-исследовательские институты и промышленные предприятия создали около 515 ускорителей для осуществления промышленных радиационно-технологических процессов [6, 7]. Электронные ускорители для радиационно-технологических установок разработаны на предприятиях: ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск); ФГУП “НПП “Торий” (Москва); ФГУП “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова” (Санкт-Петербург); ОАО МРТИ РАН (Москва); НИЯУ МИФИ (Москва); Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск); Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург); МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ им. Д.В. Скобелкина); ФГУП “НПП “Исток” (Фрязино); ФГУП

РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики (Саров); ФГУП РФЯЦ–ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина (Снежинск); ФГУП “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша” (Москва).

В 2013 г. в нашей стране в радиационном производстве на 50 предприятиях работало более 60 ускорителей, осуществляя более 20 технологических процессов [7, 8], в неразрушающем анализе — 69, в электронно-лучевой сварке — 60, для производства изотопов — более 10, для стерилизации продуктов питания и медицинских изделий — 18 установок. В настоящее время их число примерно 236, и это количество быстро растет.

Ускорители ионов с низкими энергиями от нескольких до 500 кэВ применяют в промышленности для имплантации ионов при изготовлении полупроводниковых материалов, микросхем, компьютерных чипов.

Промышленные ускорители протонов с энергиями 0.5–70 МэВ применяются в большинстве случаев для получения пучков нейтронов, для определения и изменения свойств материалов, дезактивации отработанного ядерного топлива, для производства радиоактивных изотопов. Энергии промышленных ускорителей электронов составляют от 1 до 10 МэВ. Они применяются [2, 4, 6] для сшивания полимеров, поверхностной стерилизации, радиационной обработки пищевых продуктов, в радиационной экологии (очистки жидкостей и выбросных газов, твердых отходов, дезинфекции природной воды, сточных вод, канализационных стоков), в неразрушающем анализе, включающем обеспечение безопасности при перевозке веществ через границу [31].

Кроме того, расширяется применение ускорителей в изготовлении биосовместимых материалов [32]; а также технологиях по разогреву плазмы при термоядерном синтезе.

Излучение ускорителей применяется в радиационном производстве для обработки материалов; модифицирования полимеров, упрочнения изоляции кабелей [33, 34]; вулканизации шин; отвердения покрытий, производства термоусаживающихся изделий; обработки поверхностей и пленочных изделий, отделки текстильных материалов; получения нанопорошков [35]; в радиационно-термическом крекинге нефти и во многих других процессах.

В табл. 1 приведены некоторые наиболее распространенные в нашей стране направления радиационных технологий с основными характеристиками применяемых для этих целей ускорителей, а также их количество.

Ионная имплантация — одно из наиболее распространенных промышленных применений ускорителей. В мире 26% всех ускорителей работают

именно в сфере ионной имплантации, которая в настоящее время играет значительную роль в развитии электроники (создание элементов радиосхем — диодов, триодов, микросхем, печатных плат, компьютерных чипов), а также разработке новых материалов, укреплении поверхностей металлов. Однако в России число используемых в этом направлении ускорителей значительно отстает от уровня развитых стран. Небольшое число имплантаторов действует в наукоемких отраслях (авиационной, космической, оборонной промышленности и т.д.).

К 2015 г. на предприятия страны для неразрушающего контроля было поставлено [36] 30 ускорителей электронов с энергиями 6 и 10 МэВ производства ВНИИЭФА, позволяющих просвечивать изделия толщиной до 600 мм в эквиваленте толщины стали. Вместе с досмотровыми ускорительными комплексами в России работает 69 ускорителей (3.5% всех ускорителей в мире в этой области применения), что составляет 8% всех ускорителей у нас в стране.

Большие перспективы могут быть при использовании пучков протонов, электронов и узконаправленных пучков гамма-излучения для оборонных целей. Весьма перспективны в этих целях пучки фотонов, получаемые в лазерах на свободных электронах, пучки протонов, а также весьма экзотичные на сегодняшний день идеи использования пучков нейтрино для осуществления дальней связи, например, через толщу воды или Земли. Первые такие эксперименты в Фермилаб на ускорителе Main Injector были выполнены в 2012 г. в США [25, 26, 37, 38]. Достижение необходимого для оборонных задач уровня мощности порядка мегаватт в лазерах на свободных электронах требует развития двух основных разработок: мощной электронной пушки и инжектора непрерывного действия, который может работать неделями.

В радиационном производстве, особенно в наукоемких отраслях (космической, авиационной, оборонной), осуществляется электронная сварка и резка различных материалов пучками низкоэнергетических ускорителей электронов (электронными пушками) с энергиями 20–200 кэВ. При этом пучками электронов мощностью до 250 кВт свариваются легированные стали толщиной до 150–200 мм. К 2017 г. более чем на 60 предприятиях страны осуществлялась электронно-лучевая сварка, в том числе 17 комплексов работало на оборонных предприятиях [39].

Для целей радиационного производства в модификации и создании новых материалов, например, радиационно-сшитого пенополиэтилена, компанией ООО “ПФК Техпрокомплект”, которое оснащено ускорителем марки ЭЛВ-4, обработка пленок и лент осуществляется пучком (мощностью 300–350 кВт) с энергией 0.5–1.0 МэВ, а шин — с

Таблица 1. Ускорители в радиационных технологиях России

№	Применение	Частица	Энергия, МэВ	Мощность, кВт, доза кГр	Тип ускорителя	Количество ускорителей			
1	Имплантация ионов — создание новых материалов — интегральных схем	ионы	0.001–5 100 мА	100 кВт	ВВУ	~5			
2	Неразрушающий контроль — дефектоскопия; — анализ структуры материалов	e^- , γ , p	25–30		ЛУ, ВУ, микротроны	~30			
3	Безопасность и оборона — досмотровые комплексы — оборона	γ , e^- , p γ , e^-	1.25, 2–10		Изотопы, ЛУ, ЦУ	~39			
4	Электронно-лучевая сварка (ЭЛС)	e^-	0.02–0.2 0.0003–1А	1–3 кВт ~250	ВВУ	~60			
5	Радиационное производство: — обработка материалов;	e^- , γ e^- , γ	0.5–5.0 0.02–0.2	300–350 кВт	ВВУ, ЭЛВ-2, -3, ИЛУ-6, Пиксис Аврора ЭЛВ-2, -3; ЭЛВ-2, -4, -6, -8	49			
	— модифицирование полимеров; — отверждения покрытий;	e^- e^-	<0.5 0.3–5			1–10 кВт 1–25 кВт	>2 >1		
	— радиационно-сшитый вспененный полиэтилен; — модификация изоляции кабелей; — производство термоусаживающихся изделий; — обработка компонентов шин;	e^- e^- , γ e^-	0.3–5 0.07–0.3 0.5–3			100 кВт 300–350 кВт	ЭЛВ-3, -6 ЭЛВ-3	~10 >4 1	
	— обработки поверхностей и пленочных изделий; — получение нанопорошков	e^-	0.3–0.5 до 0.5			10 кВт 100 кВт	М-13, ТУР-3 ОНЕГА	3	
			0.2–2.5			100 кВт	УРТ-1, -0.5	>1	
	6	Радиационная экология — очистка сточных вод и выбросных газов;	γ			0.5–10	0.4–5 кГр	ЛУ	~5
	7	Стерилизация: — медицинских изделий; — обработка продуктов питания	e^- , γ			1.25, 1–10	10–50 кГр <25 кГр	УЭЛВ-10-10; УЭЛВ-10-10-1 СТЕРУС-1; ИЛУ-6, ИЛУ-10 У-003 Синус-200	18 10 8
8	Производство изотопов (в т. ч. ПЭТ)	p , n	4–70	~1 мА	Цикл., ВВУ, ЛУ Реактор	10			
9	Структуры Росатома и другие предприятия					10			
	ВСЕГО					~236			

энергией 0.8–1.0 МэВ. В России обработка компонентов шин осуществляется лишь на нескольких предприятиях, а в США, Японии и Европе бо-

лее 90% шин проходят радиационную обработку. Радиационная модификация изоляции проводов и термоусадочной оплетки для повышения тепло-

устойчивости проводов и кабелей очень широко распространена в ведущих странах мира. В России также увеличивается доля такой обработки, например, на предприятии ОАО НП “Подольскабель” [34]. Мировой рынок этих технологий в 2014 г. составил более 4 млрд долл.

Радиационные технологии успешно применяются для изменения цвета стеклянных изделий, драгоценных и полудрагоценных камней (например, топаза, агата, нефрита, турмалина, циркона, жадеита, кварца, берилла, скаполита, алмаза, жемчуга и др.) [40–43].

В атомной энергетике, которая производит 16.2% мировой электроэнергии, и ее доля постоянно растет, ускорители выполняют важную задачу переработки отходов ядерного топлива с целью сокращения радиотоксичности и времени жизни отходов [44, 45]. Разрабатываются технологии, позволяющие использовать пучки заряженных частиц непосредственно при работе реактора, что существенно может повысить надежность при выработке атомной энергии.

Весьма перспективным является использование ускорителей для осуществления термоядерного синтеза [46], радиационно-термического крекинга нефти, а также в радиационной экологии (очистка воды и газов [47–49], утилизация отходов). Здесь мировой рынок по оценкам экспертов к 2020 г. может достигнуть 200 млрд долл.

Использование ионизирующих излучений для стерилизации и радиационной обработки сельскохозяйственной продукции заключается в том, что под действием ионизирующего излучения резко сокращается количество бактерий различных видов. Из 3000 видов микроорганизмов при дозе 10–40 крад погибает 75–85% видов, а при дозе более 100 крад — практически 100% микроорганизмов. К тому же воздействие происходит при комнатной температуре, и не меняются ни вкусовые, ни биохимические характеристики продукции.

В сельском хозяйстве источники гамма-излучения (^{60}Co и ^{137}Cs) и ускорители электронов с каждым годом применяются все шире [50–57] для стерилизации продуктов, в радиационной генетике и селекции, исследовании и обработке почв. Они эффективно уничтожают вредителей, увеличивают срок хранения сельскохозяйственной продукции, замедляют прорастание семян, овощей при длительном хранении, осуществляют предпосевную стимуляцию для повышения урожайности. За несколько последних десятилетий радиационная генетика позволила вывести более 200 видов новых растений.

Рост радиационной обработки продуктов питания и сельскохозяйственной продукции обусловлен расширением рынка потребления, потерями

Таблица 2. Установки для радиационной стерилизации продуктов питания в некоторых странах мира в 2015 г.

Страна	Гамма-установки 100 кКи–10 МККи	Ускорители электронов 200 кэВ–10 МэВ
США	>30	>500
Япония	>8	>300
Китай	>80	>140
Бразилия	>7	>18
Индия	17	4
Россия	~4	~18
Остальные страны	154	528

продукции при хранении, транспортировке, большим числом отравлений. Общее количество γ -источников и ускорителей, используемых для радиационной обработки продуктов питания, в последние годы по данным МАГАТЭ соответственно составляет 300 и 1500 единиц [6]. В табл. 2 представлено распределение радиационных установок для стерилизации по некоторым странам мира. Наибольшее количество ускорителей установлено в США (более 500) и Японии (более 300).

По заключению экспертов МАГАТЭ и ВОЗ облучение любого пищевого продукта с общим средним уровнем дозы до 15 кГр не создает никакой токсикологической опасности. Обработка пучками электронов до уровня доз 20 кГр не вызывает вкусовых проблем, а также изменений в биологическом состоянии облучаемых продуктов. Для радиационной обработки продуктов разрешено применять γ -излучение ^{60}Co ($E = 1.25$ МэВ) и ^{137}Cs ($E = 0.66$ МэВ) и ускорители электронов с энергией не более 10 МэВ.

В 69 странах мира ионизирующим излучением к 2020 г. будет обрабатываться [58] более 488 тыс. т пищевой продукции (более 80 видов пищевых продуктов), в том числе в Китае 200 тыс. т, в США — 103 тыс. т, в Юго-Восточной Азии — 75 тыс. т, в Европе — менее 10 тыс. т. Это, например, мясо (фарш), овощи, фрукты, какао, кофе, яйца, овсяные хлопья, пиво, консервы, приправы, сгущенное молоко и т.д. Мировая стоимость услуг по облучению продуктов питания и сельскохозяйственной продукции составляла в 2016 г. ~2.3 млрд долл. Прогнозируется увеличение объема услуг по облучению продуктов питания к 2020 г. до 1 млрд, а к 2030 г. — до 10.9 млрд долл.

Наибольшее количество центров радиационной

обработки действует в США, Японии и Китае, соответственно более 530, 308 и 220.

В России действует 17 центров радиационной обработки продуктов питания и стерилизации предметов медицинского назначения. В них работает четыре гамма-установки и 18 ускорителей электронов (три специализированных центра, а также порядка 15, размещенных в научно-исследовательских учреждениях). Потенциально в нашей стране можно выйти на уровень облучения порядка 250 тыс. т сельскохозяйственной продукции. Для этого необходимо построить 30–40 центров радиационной обработки. В этой области разрабатываются проекты нескольких новых центров радиационной обработки продуктов питания.

Под радиационной стерилизацией понимают облучение медицинских изделий одноразового применения пучками ионизирующих излучений, а под радиационной обработкой продуктов питания, растительного сырья — их облучение пучками ионизирующих излучений (фотонов и электронов). Обычная стерилизация осуществляется при высокой температуре. Однако таким образом нельзя стерилизовать, например, лекарственные препараты. Они могут при высокой температуре менять свои свойства. Стерилизация ионизирующим излучением не требует высоких температур, обладает высокой надежностью. Радиационная стерилизация медицинских изделий в последние годы применяется все чаще во многих странах мира. В настоящее время таким способом стерилизуется более 50% медицинских изделий одноразового использования: шприцы, иглы, приборы для забора крови, хирургические принадлежности, имплантируемые материалы, а также упакованные в тару вата, бинты, медицинские упаковки, многие виды лекарственных препаратов и т.д. Также осуществляется радиационная стерилизация крови (системы переливания и взятия крови, мешки для хранения крови). Таких центров, как и действующих в них ускорителей, примерно половина (девять центров и девять ускорителей).

В современной медицине используется почти треть всех действующих в мире ускорителей для лечения онкологических заболеваний и диагностики [58–62]. Всего медицинские ускорители используются в 117 странах мира. В 14 ведущих странах работает 9155 медицинских ускорителей (табл. 3), причем Россия занимает 13 место.

В России работает или устанавливается около 370 установок для дистанционной лучевой терапии: 181 ускоритель электронов, четыре центра протонной терапии (еще два в настоящий момент находятся в процессе строительства), девять стереотаксических установок “кибернож”; 173 источника γ -излучения ^{60}Co и пять гамма-ножей [8]. Причем

Таблица 3. Медицинские ускорители в ведущих странах мира [63]

Страна	Количество населения на один ускоритель, тыс. жителей	Население страны, млн чел.	Ускорители, количество единиц
США	90	325.9	3610
Китай	1262	1371.0	1086
Япония	145	126.7	872
Германия	157	82.2	523
Франция	138	70.0	504
Италия	134	60.6	452
Великобритания	189	65.4	346
Бразилия	704	205.7	292
Канада	126	35.4	279
Испания	171	46.4	271
Индия	4943	1310.0	265
Турция	333	79.8	239
Австралия			220
Россия	749	146.8	196*
ВСЕГО			9155

* Количество ускорителей по данным МАГАТЭ выше приведенных в обзоре, поскольку включены ускорители, находящиеся в состоянии установки и наладки.

количество ускорителей лишь в последние годы превысило количество кобальтовых установок.

Установок для брахитерапии в России — 183, рентгенотерапевтических аппаратов — 514, систем дозиметрического планирования — 343. В лучевой диагностике на 2013 г. работает 1104 компьютерных, 573 МРТ-томографов, 26 177 — приборов УЗИ. Структура лучевых исследований выглядит так: УЗИ — 41%, рентген — 32%, флюорография — 24%, МРТ — 1%, КТ — 2% [64].

Только в Москве в 19 медицинских учреждениях действует 38 ускорителей, в том числе работают или устанавливаются пять стереотаксических установок “кибернож”. Это соответствует примерно одному ускорителю на 380 тыс. населения, что в 3 раза лучше, чем в среднем по стране, но в 2–3 раза хуже, чем в ведущих странах мира.

Чтобы достигнуть средневропейской оснащенности клиник медицинскими ускорителями, их число необходимо увеличить как минимум в 6 раз. За период 2000–2013 гг. фирмами Varian, Elekta и

Siemens в разные города России в рамках государственных и частных контрактов было поставлено и установлено около 120 ускорителей. В нашей стране последние годы ведется разработка отечественного медицинского линейного ускорителя с энергией 6 МэВ совместно подразделениями Росатома, предприятия “Торий”, онкологического института им. П.А. Герцена и НИИЯФ МГУ.

3. РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Большое значение приобрели радиационные технологии с использованием радиоактивных изотопов [63, 65–68]. Из более 3000 известных в настоящее время изотопов, в том числе 271 стабильного изотопа, в мировом хозяйстве может использоваться примерно 300 видов нуклидов. На практике используется примерно 100 радиоактивных изотопов. Общее количество приборов, устройств, элементов на основе радиоактивных изотопов делится примерно на две равные части между промышленностью и медициной.

Ядерная медицина включает в себя радионуклидную диагностику и терапию. Только для медицинских целей в 2010 г. объем рынка радиоизотопной продукции составлял 22 млрд долл., а к 2020 г. он может вырасти до 60 млрд долл. По оценкам экспертов рост мирового рынка продукции и услуг ядерной медицины в целом в 2015 г. составил 84 млрд долл., а в 2020 г. может достичь 315 млрд долл. Общий объем рынка изотопной продукции в настоящее время приближается к 170 млрд долл., а в 2020 г. может превысить 600 млрд долл. [69]. Темпы ежегодного прироста общего объема изотопной продукции последнее десятилетие превышают 35%.

В мире для производства изотопов используются 1500 ускорителей [6] (в основном циклотронов и небольшого числа высоковольтных ускорителей), причем их число для производства радиоактивных изотопов (в промышленных целях около ~700, а для медицины — ~800) с каждым годом неуклонно растет.

Основными источниками получения радионуклидов медицинского назначения являются реакторы и ускорители заряженных частиц — циклотроны с энергией 4–70 МэВ. Они производят в зависимости от энергии от четырех изотопов (для ПЭТ диагностики) до 50. На ускорителях с энергией выше 30–40 МэВ для исследовательских задач производят долгоживущие изотопы, например, ^{201}Tl , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{103}Pd .

Для производства изотопов используется более 230 исследовательских реакторов в 56 странах-членах МАГАТЭ. Так, например, в США только в ПЭТ-центрах действует более 200 циклотронов.

Темпы развития использования радионуклидов в медицине столь велики, что в США в 2014 г. доход рынка радиофармпрепаратов (РФП), используемых в диагностике и терапии, составил более 8 млрд долл.

В настоящее время для медицины производится более 45 видов радионуклидов, в том числе в диагностических целях используется около 27 видов радионуклидов, в терапевтических целях — около 37. Группу радионуклидов, получаемых генераторным методом, образующихся при распаде β^+ и β^- , а также в результате электронного захвата и изомерных переходов, составляют 20 радионуклидов.

Установки, действующие на основе радионуклидов, составляют примерно 27 тыс. единиц или около 24.5% от общего числа высокотехнологичной медицинской техники (~110 тыс. единиц). При этом основная доля этого оборудования используется в радионуклидной диагностике — 23 тыс. единиц (85%), а в дистанционной и контактной лучевой терапии немного менее 15%.

В России из всех существующих радионуклидных источников, приборов и установок в медицинских учреждениях применяется около 1500 [8], в учебно-научных учреждениях — ~7500, а остальные используются в народном хозяйстве. Число установок в России, использующих радиоактивные изотопы как для дистанционной и контактной лучевой терапии, так и для диагностики, составляют соответственно 306 и 272 единицы. В лучевой терапии это 173 установки дистанционной лучевой терапии ^{60}Co , 128 установок для контактной лучевой терапии (брахитерапии), пять γ -ножей. В радионуклидной терапии действует четыре центра (46 коек). В радионуклидной диагностике успешно используются 282 ОФЭКТ-сканера, 54 ПЭТ-сканеров, работает пять центров радионуклидной диагностики. При потенциальной потребности в радионуклидной терапии (РНТ) в России пролечивать 50 тыс. онкологических больных, пролечивается только 2 тыс.

В мире производится 200 наименований радиофармацевтических препаратов. Это позволяет проводить 13 млн процедур, 100 млн лабораторных тестов, 50 тыс. терапевтических доз. Производство РФП в США к 2020 г. может приносить доход более 20 млрд долл. В России используется 22 РФП и 6 видов РФП для ПЭТ. Для достижения европейского уровня РНД необходимо создать 260 отделений, 100 ПЭТ-центров, в РНП — 23 отделения на 245 мест [69].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ — ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

В нашей стране радиационные технологии развиваются почти 120 лет. И многие идеи, технологии и приборы рождались в России.

В девяностые годы прошлого столетия страна утратила многие передовые технологии, а парк техники, использующийся в науке, народном хозяйстве и медицине, существенно устарел. Но в настоящее время происходит возрождение отрасли. В этом процессе участвует множество учебных, научных и коммерческих организаций при активной поддержке со стороны государства. Анализ сложившейся ситуации показывает следующее. Общее количество радиационных установок в народном хозяйстве страны растет на 5–7% ежегодно, лишь незначительно отклоняясь относительно 150 тыс. единиц. Из них рентгеновские приборы составляют 40–43%, приборы и техника, отдельные источники, использующие радиоактивные изотопы, 51–54%. Часть этой техники меняется на новую и более совершенную. В целом она (за исключением реакторов и некоторых сложных приборов) относительно недорога и проста в эксплуатации. Особое положение занимают ускорители, позволяющие значительно продвинуть высокие технологии в различные области хозяйства нашего государства. Анализируя их роль в народно-хозяйственных технологиях, необходимо отметить следующее.

В фундаментальной науке общее количество ускорителей меняется незначительно. Происходит их модернизация. Предпочтительными становятся международные проекты, которые экономически трудны для отдельных стран, например, БАК или управляемый термоядерный синтез. У нас такой международный проект “Ника” реализуется в ОИЯИ (Дубна). К важнейшим фундаментальным исследованиям XXI в. относятся поиск новых методов, позволяющих увеличить темп увеличения энергии (выше 100 МэВ/м), уменьшение размеров ускорителей: создание ускорителей на “холодных магнитах” и с “холодными ускоряющими структурами”, создание источников синхротронного излучения четвертого поколения и лазеров на свободных электронах. Развивается разработка пучковых технологий для оборонных целей.

Рентгеновская и изотопная техника в науке в значительной степени используется для решения прикладных задач и отработки новых технологий для народного хозяйства. В народном хозяйстве количество рентгеновской техники вполне соответствует международному уровню. Одна из важнейших задач — увеличение доли собственного рентгеновского оборудования на внутреннем рынке, а

также создания производств сложного рентгеновского оборудования, например, КТ, совмещенных систем КТ/МРТ, КТ/ОФЭКТ, которые позволяют одновременно визуализировать и анализировать функциональные и морфологические характеристики тканей и органов.

В нашей стране одним из наиболее развитых направлений радиационных технологий является неразрушающий анализ. Здесь широко используется и рентгеновская техника, и ускорители, и радиоактивные источники.

В промышленности развито использование электронно-лучевой сварки, получение радиоактивных изотопов, в меньшей степени радиационная обработка различных полимерных изделий, стерилизация медицинских изделий и радиационная обработка сельскохозяйственной продукции. Использование радиационных технологий в других отраслях носит в основном характер отдельных проектов. Для развития отечественной микроэлектроники необходимо существенно усилить внедрение радиационных технологий. В этой отрасли наша страна существенно отстает от ведущих стран мира.

Основным инструментом промышленных радиационных высоких технологий являются ускорители. Распределение ускорителей в отраслях народного хозяйства России значительно отличается от мирового. Так, в медицине задействовано 37%, 11% работает в научных и учебных заведениях, а в народном хозяйстве лишь 52%. Это существенно отличается от распределения ускорителей в ведущих странах мира. Для приближения к этому уровню количество ускорителей, работающих в медицине, необходимо увеличить примерно в 5 раз — до 870 единиц. Это приближается к уровню в развитых странах Европы — один ускоритель на 100–140 тыс. жителей, т.е. при таком увеличении в России будет приходиться один ускоритель на 167 тыс. жителей.

В мировом хозяйстве в целом используется ускорителей примерно в 2 раза больше, чем в медицине. В России ускорителей в народном хозяйстве должно быть по среднеевропейским меркам примерно 1700. Чтобы соответствовать мировому уровню, число ускорителей в народном хозяйстве России должно быть увеличено в 7 раз.

В промышленности у нас 936 γ -установок, а вместе с ускорителями — 1181 γ -излучатель. С учетом этого факта число радиационных установок в промышленности должно вырасти в 2–4 раза, но при этом часть γ -установок должна быть заменена на ускорители.

Таким образом, чтобы соответствовать мировому распределению ускорителей по основным отраслям мировой экономики, у нас должно быть

Таблица 4. Структура использования медицинской техники

Оснащение техникой, %	КТ	МРТ	РНД	УЗИ	Рентгено-скопия	Флюорография
Англия	10.0	6.0	2.0	22.0	3.0	57
Россия	1.9	0.6	0.7	39.9	1.4	42.8

~870 ускорителей в медицине, ~1700 ускорителей в народном хозяйстве и ~60–70 в фундаментальной науке. Всего у нас должно быть примерно 2630 ускорителей, то есть в ~5.5 раз больше, чем сейчас.

В целом по объему используемой рентгеновской техники мы сравнимы со странами Европы. В лучевой диагностике в России (этот термин является синонимом общепринятого в нашей стране названия этой специальности “рентгенология”) за последние 10 лет ситуация существенно изменилась: расширился парк современной аппаратуры для лучевой диагностики, увеличилось число цифровых рентгеновских аппаратов и маммографов, магнитно-резонансных и компьютерных томографов (МРТ и КТ), γ -камер и позитронных эмиссионных томографов (ПЭТ). Ее цель — использование всего потенциала достижений физики и медицинской техники нового поколения для быстрой и точной диагностики.

В рентгенологии активно ведутся исследовательские работы по молекулярной диагностике (molecular imaging), когда становится возможным очень раннее выявление болезней на основе обнаружения “больных” клеток или молекул. Они реализуются с помощью радионуклидных методов, таких как однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионная томография, новейшие методики МРТ, особенно в комбинированных системах ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/МРТ.

Необходимо развивать такие передовые работы, как, например, в Пекинском университете, где группа исследователей приступила к реализации проекта по разработке универсальной диагностической установки, совмещающей в себе четыре вида томограмм: КТ, ПЭТ, ОФЭКТ и ФМТ (флюоресцентную молекулярную томографию) [69].

Задачей физиков остается поиск методов визуализации, основанных на принципиально новых физических принципах. В России необходимо сократить отставание от ведущих стран в оснащении медицинской техникой и разнообразии радиологических процедур. Сравнение структуры использования медицинской техники у нас и в Англии представлено в табл. 4.

В России собственное производство всего спектра рентгеновского оборудования составляет

примерно 40% единиц техники, причем в основном дешевой. Высокотехнологическое оборудование поступает в большей степени из-за рубежа. Отсутствует производство томографов (КТ, МРТ, ПЭТ). По прогнозам экспертов только объем закупок компьютерных томографов в 2018 г. превысит 550 млн долл. Не ведутся у нас разработки совмещенных диагностических систем ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/МРТ. В ведущих странах реализуются исследовательские проекты, позволяющие совмещать в “реальном времени” лучевую терапию и диагностику, как это происходит в томотерапии. Такие работы без поддержки государства осуществить трудно.

В ядерной медицине исключительно важной задачей остается проведение полного цикла работ по производству радиоизотопов медицинского назначения и радиофармпрепаратов в России без участия зарубежных фирм на конечном этапе создания продукта. Только в этом случае мы займем передовые позиции в создании нового поколения РФП (био-РФП) для терапии и диагностики [69].

Представляется важным развитие собственных идей для создания высокотехнологичной техники. Для выхода на передовые позиции в развитии лучевой терапии необходимо интенсифицировать работы по созданию линейных ускорителей и циклотронов, использующих сверхпроводящие высокочастотные резонаторы с целью увеличения темпа ускорения частиц, а также по разработке микро-ускорителей. Уменьшение размеров медицинских ускорителей для протонной и ионной терапии делает их более конкурентными с ускорителями электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. С. Рябухин, А. В. Шальнов, *Ускоренные пучки и их применение* (Атомиздат, Москва, 1980).
2. R. W. Hamm, *Rev. Accelerator Sci. Techn.* **1**, 163 (2008).
3. А. С. Алимов, Препринт № 2011-13/877, НИИЯФ МГУ (Москва, 2011).
4. А. К. Пикаев, *Успехи химии* **64**, 609 (1995) [*Russ. Chem. Rev.* **64**, 569 (1995)].
5. А. П. Черняев, *Ускорители в современном мире* (Изд-во МГУ, Москва, 2012).
6. Н. С. Андреева, А. А. Брызгин, С. В. Будник, Н. В. Марков, Н. Б. Мильман, И. М. Михеева, А. А. Молин, С. М. Полозов, А. Д. Фертман, В. И. Шведунов, *Радиационные технологии: взгляд из России* (Ассоциация РадТех, Москва, 2015).
7. Ю. С. Павлов, *Российские электронно-лучевые технологии в 2013 году* (ИФХЭ РАН, Москва, 2013).

8. *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2016 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации)* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2017).
9. *Развитие рентгенотехники в России*, https://trauma.ru/content/articles/detail.php?ELEMENT_ID=20420
10. А. Б. Блинов, Н. Н. Блинов, В. Л. Ярославский, *Радиология—практика* **1**, 51 (2010).
11. *Публичный годовой отчет Корпорации Росатом* (Москва, 2011).
12. В. Е. Синицын, *Частная практика* **1**, 32 (2013).
13. И. Г. Камышанская, В. М. Черемисин, Е. С. Питель, А. Б. Садуакасова, *Клиническая медицина Казахстана* **2** (21), 17 (2011).
14. Н. Н. Блинов, А. И. Мазуров, *Медицинская техника*, № 5, 1 (2012).
15. Н. Н. Блинов, А. Н. Гуржиев, Н. Е. Станкевич, *Менеджер здравоохранения* **8**, 59 (2004).
16. С. К. Терновой, В. Е. Синицын, <https://rosopcoweb.ru/library/radiodiagnosics/002.php>
17. И. А. Шапошникова, К. В. Шапошников, *Молодой ученый*, № 23, 680 (2015).
18. Е. Г. Комар, *Вестн. АН СССР* **43** (12), 23 (1973).
19. L. Rosen, *CERN Courier* **11**, 159 (1971).
20. Craig S. Nunan, *Present and Future Applications of Industrial Accelerators* (1989).
21. U. Amaldi, *Accelerators for Medical Applications* (Tero Foundation, CERN, 1994).
22. W. Scharf and W. Wieszczycka, in *Proceedings of the 15th International Conference on the Applications of Accelerators in Research and Industry, Denton, TX, USA, 1998* (AIP, 1999), p. 949.
23. U. Amaldi, in *Proceeding of EPAC 2000, Vienna, 2000* (CERN, 2001), p. 3.
24. Robert W. Hamm, *Accelerators and Instrumentation for Industrial Applications* (CEO & President, R&M Technical Enterprises, 2008).
25. *Accelerators for America's Future* (US DOE, Washington, 2010).
26. N. Holtkamp, *Interim Report to HEPAP* (2012).
27. А. П. Черняев, С. М. Варзарь, *ЯФ* **77**, 1266 (2014) [*Phys. At. Nucl.* **77**, 1203 (2014)].
28. R. Hamm, in *Proceedings of the IPAC-13* (Shanghai, 2013), p. 2100.
29. <http://ptcog.web.psi.ch/ptcentres.html>
30. *Радиационно-гигиенический паспорт РФ* (ФЦГЭ Роспотребнадзора, Москва, 2013).
31. С. А. Огородников, С. В. Симочко, Ю. В. Малышенко, *Таможенная политика России на Дальнем Востоке*, № 1(66), 70 (2014).
32. A. Dziedzic-Goclawska, A. Kaminski, I. Uhrpowska-Tyszkiewicz, J. Michalik, and W. Stachowicz, in *Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products* (IAEA, Vienna, 2008), p. 231.
33. П. В. Аксамирский, Н. К. Куксанов, А. Б. Машнин, П. И. Немытов, Р. А. Салимов, *Электротехника* **7**, 46 (1997).
34. А. В. Бублей, М. Э. Вейс, Н. К. Куксанов, В. Е. Долгополов, А. В. Лаврухин, П. И. Немытов, Р. А. Салимов, Н. И. Громов, В. Г. Ванькин, А. И. Ройх, С. П. Лыщиков, М. Н. Степанов, *Наука и техника*, № 4 (287), 16 (2004).
35. S. P. Bardakhanov, A. I. Korchagin, N. K. Kuksanov, A. V. Lavrukhin, R. A. Salimov, S. N. Fadeev, V. V. Cherepkov, and M. E. Veis, *Probl. At. Sci. Techn.*, no. 5, 165 (2008).
36. <http://www.niiefa.spb.su/site/left/accelerat/electrons/defectoscop/?lang=ru>
37. <https://arxiv.org/abs/1203.2847v2>
38. <http://www.dailytechinfo.org/np/3428-proizvedenapervaya-uspeshnaya-popytka-peredachi-informacii-s-pomoschyu-neytrinnogo-lucha.html>
39. *Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки-2008: материалы I Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции* (ВиТ-Принт, Санкт-Петербург, 2008).
40. Е. В. Колонцова, *УФН* **151**, 149 (1987) [*Sov. Phys. Usp.* **30**, 64 (1987)].
41. Y. Song and X. Yuan, *J. Geogr. Geol.* **1**(2), 13 (2009).
42. <http://www.webois.org.ua/jewellery/stones/katalog-topaz.htm>
43. http://geo.web.ru/druza/m-topz_6_2639_zon.JPG
44. Т. Валеев, *Совершенно секретно*, № 6 (395) (2017).
45. А. А. Воронин, А. М. Воронин, *Вестн. НИА РК* **1**, 153 (2003).
46. Л. Жилияков, *Наука и жизнь*, № 1, 10 (2000).
47. Н. Яверт, *Бюллетень МАГАТЭ*, № 9, 12 (2015).
48. А. В. Егоркин, А. В. Зыкин, *Безопасность окружающей среды*, № 1, 47 (2008).
49. <https://sib.fm/news/2015/04/23/promyshlennye-uskoriteli-chastic-dlja-ochistki-stochnykh-vod>
50. *Общий стандарт на пищевые продукты, обработанные проникающим излучением*, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003
51. А. А. Молин, *Тр. Междунар. форума "Атом-экспо 2012"*, Москва, 4 июня 2012, <http://2012.atomexpo.ru/>
52. Р. М. Алексахин, Н. И. Санжарова, Г. В. Козьмин, А. Н. Павлов, С. А. Гераськин, *Вестник РАЕН* **14**, 78 (2014).
53. Г. В. Козьмин, С. А. Гераськин, Н. И. Санжарова, *Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности* (Информполиграф, Москва—Обнинск, 2015).
54. И. В. Полякова, В. О. Кобялко, В. Я. Саруханов, Г. В. Козьмин, Н. И. Санжарова, И. Н. Лыков, *Радиация и риск* **24**(4), 43 (2015).
55. *Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products* (IAEA, Vienna, 2008).
56. И. Н. Михеева, *Радиационные технологии* (НИЯУ МИФИ, Москва, 2016).
57. Т. Голикова, *Проект доклада Министра здравоохранения и социального развития РФ по развитию ядерной медицины на заседании*

- Комиссии по модернизации и технологическому развитию при Президенте РФ*, <http://www.minzdravsoc.ru/health/high-tech/35>
58. В. А. Костылев, Б. Я. Наркевич, *Медицинская физика* (Изд-во Медицина, Москва, 2008).
 59. А. П. Черняев, ЭЧАЯ **43**, 500 (2012) [Phys. Part. Nucl. **43**, 262 (2012)].
 60. *Статус и перспективы развития ядерной медицины и лучевой терапии в России на фоне мировых тенденций, Доклад общественной палаты РФ* (Москва, 2008).
 61. МАГАТЭ. Распределение ускорителей по странам мира.
 62. И. Е. Тюрин, Вестн. рентгенологии и радиологии **98**(4), 219 (2017).
 63. С. Романова, Ремедиум, № 6, 8 (2013).
 64. В. Н. Корсунский, Г. Е. Кодина, А. Б. Брускин, Атомная стратегия, № 31, 4 (2007).
 65. Б. Г. Ершов, Вестн. РАН **83**, 885 (2013).
 66. А. Родионова, Д. Шубина, *Vademecum* **3**, 19 (2018).
 67. В. Н. Корсунский, Г. Е. Кодина, А. Б. Брускин, *Российское Общество Ядерной Медицины – Ядерная медицина. Современное состояние и перспективы развития*; <http://www.nuclearmedicine.ru/index.php/analitika/2010-03-22-20-08-39/85-2010-07-09-11-41-11>
 68. В. В. Уйба, Доклад “Ядерная Медицина — проект будущего” (ФМБА, 2012).
 69. Д. А. Ковалевич, *Радиационные технологии* (Ядерный кластер Фонда “Сколково”, 2012).

PROSPECTS OF RADIATION TECHNOLOGIES DEVELOPMENT IN RUSSIA

A. P. Chernyaev, S. M. Varzar, A. V. Belousov, M. V. Zheltonozhskaya, E. N. Lykova

Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Russia

The review describes the role of radiation technologies in world economy: fundamental science, industry, agriculture and medicine. The radiation technologies development in world and in Russia is compared. Total number of ionizing radiation sources in the world is approximately 11 million units, most of them are radioactive sources (~6–7 million units) and X-ray units (~4 million units). The number of high-tech installations (such as accelerators, various types of tomographs and others) using ionizing radiation does not exceed 200 thousand units. More than 153 thousand units of such devices and installations are in Russia. There are ~64700 units including instruments, facilities and complexes using X-rays, ~79700 radioisotope instruments and installations, reactors, radioactive waste storage facilities and ~471 accelerators. The article discusses prospects for radiation technologies development in Russia. The state of high technologies in the Russia national economy and in the world are compared. The most promising directions for radiation technologies development in Russia are analyzed strategically and economically.