

УСКОРИТЕЛИ В МИРОВОМ ХОЗЯЙСТВЕ

*А. П. Черняев^{а,б,1}, С. М. Варзарь^а, П. Ю. Борщеговская^а,
А. В. Белоусов^а, У. А. Близнюк^а*

^а Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

В настоящее время в медицине, сельском хозяйстве и промышленности широко применяются ионизирующие излучения. Их источниками являются рентгеновские трубки, естественные и искусственные изотопы, ускорители. В настоящей работе представлены данные по ускорительным установкам, которые работают в различных отраслях мирового хозяйства.

Currently, medicine, agriculture and industry widely apply ionizing radiation. Its sources are X-ray tubes, natural and artificial isotopes, accelerators. This paper presents data on the accelerator facilities, which operate in various sectors of the world economy.

PACS: 87.56.-v

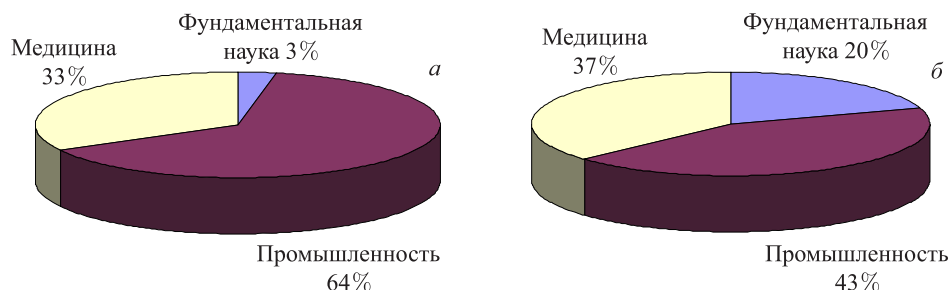
ВВЕДЕНИЕ

Практически с момента открытия излучений, проникающих через непрозрачные среды, началось использование ионизирующих излучений в различных отраслях мирового хозяйства. Ускорители стали не только важнейшим инструментом ученых, они проникли в различные области деятельности — медицину, промышленность и сельское хозяйство. Размеры ускорителей стали уменьшаться, а характеристики варьироваться в широких пределах, позволяя решать все более широкий круг задач.

Из действующих в мире ускорителей (это примерно 40 тыс.) около 25 тыс. работает в промышленности (в том числе несколько сотен в сельском хозяйстве), что составляет около 64 % от общего числа установок (см. рисунок), в фундаментальной науке работает чуть более 3 % (примерно 1200 единиц), в медицине работает около 33 %. И это без учета ускорителей, используемых в закрытых работах, в частности в оборонной промышленности, а также электронных микроскопов и рентгеновских трубок.

Согласно статистическим данным в России по состоянию на начало 2014 г. действовало примерно 400 ускорителей электронов и 50 ускорителей протонов. Распределение ускорителей в отраслях народного хозяйства России значительно отличается от мирового. Так, в науке задействовано около 20 % работающих в стране ускорителей, в промышленности — 43 %, в медицине — 37 %. Основная часть последних (около 90 %) используется

¹E-mail: A.P.Chernyaev@yandex.ru



Распределение ускорителей заряженных частиц по областям применения: а) в мире, б) в России

в конвенциональной лучевой терапии, остальные — для протонной или ионной лучевой терапии, а также производства радиоизотопов для диагностики в центрах позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ-центрах) и технологий ядерной медицины.

В середине девяностых годов прошлого столетия темпы роста числа ускорителей в мировом хозяйстве увеличились. Намечилось увеличение темпов роста числа ускорителей, действующих в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. В науке количество ускорителей в последние двадцать лет практически не изменяется. В основном происходит их качественное обновление. Ежегодно количество ускорителей в мире возрастает по разным оценкам как минимум на 1900–2000 единиц.

1. УСКОРИТЕЛИ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

К началу 2000-х гг. доля установок для научных исследований уменьшилась до нескольких процентов. Причем многие установки используются для решения как научных, так и прикладных задач. Всего в фундаментальных научных исследованиях в 210 ускорительных центрах мира действует около 1200 ускорителей. Они включают протонные и электронные синхротроны, фазотроны, микротроны, бетатроны, циклотроны, линейные ускорители (высоковольтные, резонансные и индукционные).

В фундаментальных исследованиях большая часть ускорителей используется в научных исследованиях по физике ядра и частиц при низких (до ~ 10 МэВ) и средних энергиях (10 МэВ – 1 ГэВ). Целый ряд уникальных исследований в области взаимодействия частиц при сверхмалых расстояниях ведется на ускорителях высоких энергий с энергией выше 1 ГэВ. Сейчас их в мире действует примерно 110. Из них в России таких ускорителей 9 и два в других странах СНГ. Ускорители высоких энергий можно условно разделить на несколько групп: комплексы на встречных пучках, протонные и электронные синхротроны, источники синхротронного излучения.

Значительная часть синхротронов — источников синхротронного излучения — имеет энергию выше 1 ГэВ (по нашим оценкам это число составляет примерно 73–76). В мире работает 73 лаборатории, в которых есть один или несколько источников СИ. Всего число источников СИ в этих лабораториях 83. Основные страны, владеющие такими центрами, — это США, Япония и Германия. Россия по количеству источников СИ находится на четвертом месте.

Большая часть ускорителей, применяющихся в фундаментальных исследованиях, имеет невысокие энергии — от единиц до сотен МэВ. В Московском государственном

университете работает 9 ускорителей. Они применяются для исследований в ядерной физике, в области термоядерного синтеза и управления реакторами, в радиационной биологии, в разработке новых технологий для промышленности.

2. УСКОРИТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В промышленности и сельском хозяйстве работает примерно 25 000 ускорителей. Основная их часть используется в радиационных технологиях для создания новых материалов и изменения их свойств, а также в сельском хозяйстве и экологии.

В промышленности работает около 24 750 ускорителей ионов, протонов и электронов (соответственно 11 950, 1200 и 11 600 единиц). Энергия промышленных ускорителей в подавляющем большинстве случаев не превышает 10 МэВ, которая считается граничной для возникновения наведенной активности. В зависимости от энергии ускорители электронов, протонов и ионов условно делят на три группы: низко-, средне- и высокоэнергетические.

Ускорители ионов, применяемые в промышленности, имеют, как правило, низкие энергии (от нескольких сотен эВ до 500 кэВ). Они используются для имплантации ионов при изготовлении полупроводниковых материалов, микросхем, компьютерных чипов. Промышленные ускорители протонов имеют энергию от 0,5 до 70 МэВ. Они применяются для получения пучков нейтронов, для определения свойств материалов, дезактивации отработанного ядерного топлива. Для производства радиоактивных изотопов наиболее широко используются циклотроны с энергией 7, 18 и 70 МэВ. Интервал энергии промышленных ускорителей электронов — от десятков кэВ до 10 МэВ. К низкоэнергетическим ускорителям электронов относятся установки с энергией пучка 70–300 кэВ. Их используют для сшивания полимеров, очистки жидкостей и газов, поверхностной стерилизации, разогрева плазмы при термоядерном синтезе.

Среднеэнергетические ускорители электронов с энергией пучка 300 кэВ–5 МэВ используют для производства кабелей и проводов с радиационно-сшитой изоляцией, сшивки пластика и резины, труб, для производства термоусаживающихся изделий и пенополиэтилена, для вулканизации компонентов шин, очистки сточных вод и выбросных газов. Высокоэнергетические ускорители электронов с энергией 5–10 МэВ применяют для стерилизации медицинского оборудования, сшивки толстого пластика, в дефектоскопии.

Кроме того, расширяется применение ускорителей в изготовлении биосовместимых материалов, радиационной обработке пищевых продуктов, а также в радиационной экологии (дезинфекции природной воды, сточных вод, канализационных стоков, выбросных газов, твердых отходов). Большую популярность приобретает использование ускорителей для стерилизации медицинских приборов и лекарственных препаратов. Еще в 2008 г. в Европе и Северной Америке использовалось более 100 ускорителей.

В большинстве своем в сельском хозяйстве источники ионизирующих излучений применяются для стерилизации продуктов. Кроме того, они используются для принудительной мутации при выведении новых сортов культур с улучшенными свойствами, уничтожения вредителей, дезинсекции, для предупреждения прорастания семян при длительном хранении, для предпосевной стимуляции. Общее количество ускорителей в сельском хозяйстве — около 300 единиц, а для стерилизации медицинской продукции — 700.

3. УСКОРИТЕЛИ В МЕДИЦИНЕ

В начале 1970-х гг. в медицине работало уже более 300 ускорителей различных типов (157 бетатронов, 118 линейных ускорителей, 22 ускорителя Ван де Граафа и 9 резонансных трансформаторов). Кроме того, начались пробные эксперименты по использованию ускорителей протонов — их действовало 4, в том числе два в нашей стране. К 2000 г. количество электронных линейных ускорителей в мире достигло 5000, а по последним данным, к настоящему времени оно составляет почти 14 000. Рост числа электронных линейных ускорителей, применяемых для медицинских целей с 1960-х гг., может быть аппроксимирован квадратичной зависимостью.

Россия занимает 12-е место среди 117 стран мира, в которых в медицине используется более 100 единиц ускорителей. Число медицинских ускорителей с начала XXI в. в нашей стране растет линейно. За последние пятнадцать лет в России было заменено и установлено более 120 новых медицинских ускорителей. Сейчас используется около 160 ускорителей, если такой линейный рост будет сохраняться в последующие годы, то к 2020 г. их число может возрасти до 300 (~ 2 раза).

Из 14 000 медицинских ускорителей линейные ускорители электронов составляют более 13 тыс. Ускорителей тяжелых заряженных частиц (протонов и ионов) в медицине используется около тысячи.

Ускорители электронов применяются в традиционной лучевой терапии, интраоперационной лучевой терапии, стереотаксической хирургии. В России только в Москве в 12 медицинских учреждениях в лучевой терапии используется 29 ускорителей, в том числе 4 кибер-ножа. Всего в Москве во всех сферах народного хозяйства действующих ускорителей электронов и протонов 88 и 9 единиц соответственно.

В настоящее время в мире в 19 странах действуют 42 центра протонной лучевой терапии, а еще 36 центров находятся в стадии строительства или разработки. В 7 центрах используются пучки ионов углерода, и еще 5 таких центров находятся на стадии строительства. В нашей стране 90 действующих и 6 создаваемых (разрабатываемых) центров протонной и ионной лучевой терапии.

Ядерная медицина включает радионуклидную диагностику и терапию с использованием радиоактивных изотопов. В мире в ядерной медицине для производства радионуклидов действует около 1000 ускорителей заряженных частиц (в нашей стране 20). Для этих целей используются в основном компактные циклотроны. В последнее время развивается ряд методик получения изотопов на ускорителях электронов. Как правило, для производства изотопов для позитронной эмиссионной томографии применяются циклотроны с энергией 7, 18 или 70 МэВ. В мире работает около 600 центров, а в России их 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня ускорительные установки широко используются в фундаментальных исследованиях, в промышленности и сельском хозяйстве, а также медицине. С уверенностью можно прогнозировать увеличение темпов развития ускорительной техники во всех отраслях мирового хозяйства. Уже сейчас в ведущих странах мира она доказала свою экономическую эффективность и приносит своим странам многомиллиардные доходы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черняев А. П.* // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43, № 2. С. 500.
2. *Черняев А. П.* Ионизирующие излучения. М.: Изд-во КДУ, 2014. 314 с.
3. *Черняев А. П.* Введение в физику ускорителей. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010.