

## 50 лет ускорителям ЭЛВ

*Д.С. Воробьев, Н.К. Куксанов\*, Е.В. Домаров, Ю.И. Голубенко, А.И. Корчагин, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, И.К. Чакин, А.В. Семенов, В.Г. Черепков, М.Г. Голковский, А.В. Лаврухин*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

*\*kuksanov47@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассказывается о более чем 50-и летней истории ускорителей электронов для промышленного применения ЭЛВ. Приводится обзор нынешнего состояния, приведены конструктивные особенности как первых, так и современных, недавно разработанных ускорителей ЭЛВ.

**Ключевые слова:** ЭЛВ, ускорители электронов, промышленные ускорители, сшивка.

### 1. Введение

Начиная с 1971 года Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит ускорители электронов типа ЭЛВ для применения их в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Ускорители типа ЭЛВ построены с использованием унифицированных систем и узлов, что позволяет с минимальными затратами адаптировать их под конкретные требования заказчика по основным параметрам, таким как диапазон энергий, мощность в пучке ускоренных электронов, длина выпускного окна и т.д. Конструктивные и схемные решения предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства. Отличительными качествами ускорителей ЭЛВ являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность в работе.

### 2. Статус

Совсем недавно исполнилось 50 лет с момента завершения финальных испытаний ускорителя ЭЛВ-1 по программе межведомственной комиссии на Опытном заводе Всесоюзного Научно-Исследовательского Института Кабельной Промышленности в г. Подольск. Комиссия была создана союзным министерством электротехнической промышленности и состояла из 9 представителей как ускорительщиков (ИЯФ, НИИЭФА им Ефремова), кабельной промышленности (ВНИИКП), специалистов по радиационным технологиям (ВНИИРТ, НПО ПЛАСТИК) и Министерства общего машиностроения. Союзное Министерство Электротехнической промышленности решило оборудовать кабельные заводы ускорителями для радиационной модификации кабельной изоляции, в том числе и для удовлетворения потребностей оборонной промышленности.

По результатам испытаний комиссия рекомендовала ускоритель к промышленному применению и массовому производству. ИЯФ сразу приступил к выполнению заказа на 15 ускорителей для предприятий Минэлектротехпрома.

Сейчас Институт предлагает серию ускорителей электронов типа ЭЛВ, которые перекрывают диапазон энергий от 0.3 до 4 МэВ, с током пучка ускоренных электронов до 100 мА и максимальной мощностью до 100 кВт. Ускоритель ЭЛВ является наиболее массовым и популярным отечественным ускорителем. Начиная с 1974 г. изготовлено и поставлено более 220 машин. 120 из них до сих пор находятся в эксплуатации. Самый старый ускоритель из поставленных за рубеж работает в республике Чехия с 1980 г. Мы работаем с партнерами в Южной Корее и Китае. Заметим, что в России на Московском электромеханическом заводе имени Владимира Ильича также было освоено производство ЭЛВ. В силу экономического коллапса производство было остановлено, но несколько комплектов машин все-таки было выпущено.

Что касается диапазона энергий, то сейчас семейство ЭЛВ перекрывает диапазон энергий от 0.3 до 4 МэВ. Мощность электронного пучка достигает 100 кВт. Есть уникальная машина с мощностью выведенного пучка 400 кВт. Заметим, что мощность первых ускорителей составляла всего 20 кВт. Нынешние 100 кВт вполне адекватны требованиям потребителей и резкого увеличения мощности не предвидится. На Рис. 1 показана схема типового ЭЛВ, а на Рис. 2 показан наиболее популярный в Китае ускоритель ЭЛВ-8. [1, 2, 3]

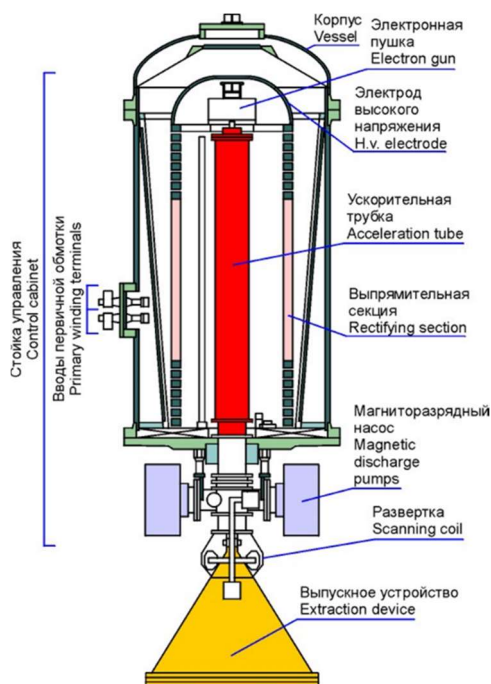


Рис. 1. Схема ускорителя ЭЛВ.



Рис. 2. Ускоритель ЭЛВ-8.

### 3. Применение

Ускорители ЭЛВ применяются практически во всех радиационно-химических технологических процессах, но главным образом они используются для радиационного модифицирования различных полимерных изделий: кабельная изоляция, термоусаживаемые ленты и трубки, производство вспененного полиэтилена и т.д. Качество радиационной обработки зависит, как от самого ускорителя, так и от технологического оборудования: системы транспортировки изделий под электронным пучком в зоне облучения, отдающих и приемных устройств, синхронизации ускорителя и транспортного оборудования. Использование электронно-лучевой технологии обеспечило выпуск широкого ассортимента кабелей, проводов и термоусаживаемых изделий для различных рынков: энергетических станций, телекоммуникаций, электроники, нефтяного сектора, атомных электростанций, подводных лодок и авиации, железнодорожном транспорте. Во всех этих отраслях необходима высокая надежность как при монтаже, так и при работе в тяжелых условиях и нестандартных ситуациях. Поэтому мы обязаны и этому уделять внимание. Мы используем выпускное устройство, увеличивающее производительность и улучшающее качество электронно-лучевой обработки. В частности, разработана система 4-стороннего облучения, снижающая азимутальную неоднородность дозы при обработке изделий цилиндрической формы. Модифицирована система сканирования для обеспечения равномерности дозы по ширине при обработке ленточных изделий.

Кроме того, ускоритель и технологическое оборудование объединены в автоматизированные синхронизированные комплексы. Такие комплексы обеспечивают

безукоризненное качество радиационного модифицирования изделий в широком диапазоне энергий и вида самих изделий как показано на Рис. 5 и 6. В рамках автоматизированного комплекса возможно управлять как ускорителем по сигналам технологической линии, так и технологической линией по сигналам ускорителя. Протокол взаимодействия ускорителя и технологического оборудования приемлем для всех технологий и оборудования, производимого различными компаниями. На Рис. 3 показано табло комплекса, а на Рис. 4 – произведенная продукция. В автоматизированном комплексе оператор не должен сидеть за пультом. Параметры процесса поддерживаются автоматически, оператор может их видеть с разных точек технологического зала, не подходя к оборудованию. Время, необходимое до смены обрабатываемого барабана высвечивается на табло.



Рис. 3. Табло ускорителя в АО «Подольскабель».



Рис. 4. Обработанная на ускорителе продукция (Индия).

#### Основные особенности ускорителей типа ЭЛВ:

1. Большая мощность электронного пучка в широком диапазоне энергий, что означает высокую производительность электронно-лучевой обработки.

2. Высокая эффективность преобразования электрической энергии в энергию пучка ускоренных электронов. Коэффициент полезного действия составляет 70 – 90% в зависимости от мощности.

3. Ускорители ЭЛВ стабильны в работе. Нестабильности энергии и тока не превышают +/-3%.

4. Простая процедура управления ускорителем благодаря автоматизированной системе управления. Это позволяет синхронизировать работу ускорителя и технологического оборудования; при этом возможна эксплуатация ускорителя в составе технологической линии в полностью автоматизированном режиме.

5. Система управления ускорителем включает в себя комплекс аппаратных и программных средств, охватывающий все узлы ускорителя, требующие оперативного управления, контроля и диагностики.

6. Собственно ускоритель имеет простую конструкцию и высокую надежность.

Совместно с компанией EbTech (electron beam technologies) (Южная Корея), мы разработали вариант мобильного ускорителя ЭЛВ, который может перемещаться по трассе. Эта машина расположена в трейлере и снабжена локальной радиационной защитой, она способна проводить электронно-лучевую обработку жидкостей, газов и сыпучих материалов. Он показан на Рис. 7. Энергия этого ускорителя — до 650 кэВ, мощность — до 30 кВт. Он не только транспортировался внутри Кореи, но был переправлен в Саудовскую Аравию, а после проведения экспериментов возвращен назад.

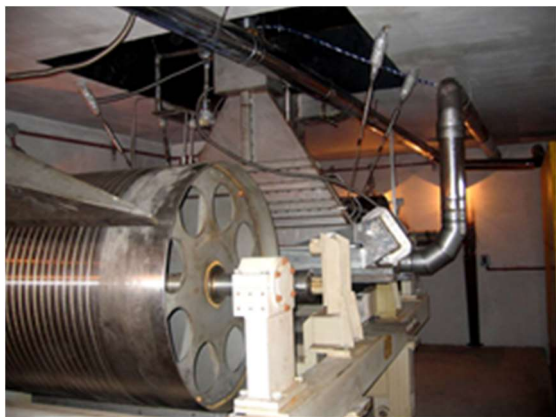


Рис. 5. Выпускное устройство с системой 4-стороннего облучения.



Рис. 6. Техническое оборудование в Южно-Корейской компании LG cable.



Рис. 7. Российско-корейская команда на фоне трейлера с расположенным внутри ускорителем.

Совместно с этой же компанией была разработана полномасштабная установка электронно-лучевой обработки сточных вод красильного производства. В ней использовался ускоритель с мощностью электронного пучка 400 кВт. Реакционный зал показан на Рис. 8. В данном ускорителе используются 3 ускорительные трубки и три выпускных устройства [3].



Рис. 8. Зал электронно-лучевой обработки сточных вод красильного производства в г. Тэгу (Южная Корея).

#### 4. Вывод пучка в атмосферу через отверстие

А.М. Будкер был пропагандистом применения ускорителей в народном хозяйстве. Он справедливо полагал, что применение ускорителей не ограничивается только радиационно-химическими процессами в области модификации полимерных материалов. Тепловое воздействие мощного сфокусированного электронного пучка может быть использовано как в металлургических процессах, резки и сварки, так и при воздействии на неорганические материалы. Для вывода в атмосферу сфокусированного пучка используется выпускное устройство с многоступенчатой системой дифференциальной откачки. Электронный пучок фокусируется магнитными линзами и в его кроссовере установлены диафрагмы с отверстиями для прохождения пучка [3].

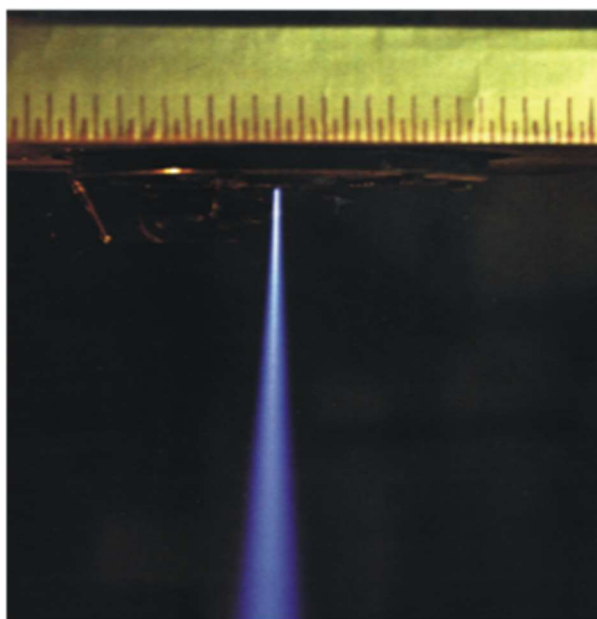


Рис. 9. Выведенный в воздух сфокусированный электронный пучок.

Откачка камер от поступающего через отверстия газа производится непрерывно работающими вакуумными насосами. С помощью ряда таких камер давление ступенчато понижается от атмосферного до рабочего давления ускоряющего устройства. На выходе выпускного устройства размер пучка не превышает 1–1.5 мм, что позволяет при мощности пучка 100 кВт иметь плотность мощности на уровне  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. На Рис. 9 показано свечение выведенного в атмосферу концентрированного пучка. Снижения яркости по мере удаления от выходного отверстия обусловлено рассеянием пучка в воздухе. Было разработано и изготовлено 3 версии вывода в атмосферу сфокусированного пучка. Версия для трубки с магнитной фокусировкой, версия для трубки с большой апертурой, версия для вывода в атмосферу адиабатически сжатого электронного пучка с током до 1А и мощностью 500 кВт. [3, 4]

В ИЯФ были проведены многочисленные успешные эксперименты по воздействию на различные материалы (металлы и сплавы, горные породы, керамика, пластмассы и др.) сфокусированного электронного пучка, выпущенного в газ при атмосферном давлении. Пучок электронов выпускался как в воздух, так и в защитную среду (аргон, гелий).

Однако, такая система выпуска пучка так и не нашла массового применения в технологических производствах. Впоследствии этот стенд получил статус уникальной научной установки (УНУ). В настоящее время на этом стенде с ускорителем, оборудованном

системой выпуска в атмосферу сфокусированного пучка, совместно с представителями различных советских, российских и зарубежных организаций были проведены и проводятся многочисленные эксперименты по использованию такого пучка в технологических процессах. В частности, были отработаны технологические режимы и получены ценные научные результаты по закалке стальных изделий (в том числе наплавка износостойких покрытий на медные плиты кристаллизаторов установки непрерывной разливки стали), проведены различные эксперименты для радиационно-термических процессов в области химии твердого тела (в том числе отработана технология получения дешевого высокоактивного катализатора синтеза аммиака из отходов производства катализаторов), разработан и реализован высокопроизводительный способ получения нанопорошков металлов и их оксидов, а также оксида кремния путем прямого испарения их из расплава, а также другие высокотемпературные технологические процессы. [5]

## 5. Заключение

В Новосибирском Институте Ядерной Физики вот уже более чем 50 лет разрабатываются промышленные ускорители электронов ЭЛВ, которые нашли широкое применение как в России, так и за рубежом. Ускорители получили признание за свою высокую надежность, ремонтпригодность и возможность адаптации под широкий ряд технологий. Тем не менее в институте продолжают разрабатываться как новые типы ускорителей ЭЛВ, так и модифицироваться уже существующие модели. Основная цель этой деятельности – быть готовыми к возможным запросам на ускорители с более высокими параметрами, что возможно в случае появления новых прорывных технологий.

## 6. Литература

- [1] D. Vorobev, E. Domarov, N. Kuksanov, et. al., ELV-15 – new accelerator for industrial applications, *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022) Tomsk, Russia*; doi:10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
- [2] Н.К. Куксанов, Д.С. Воробьев, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15, *Сибирский физический журнал*, **17**, № 1, 23, 2022; doi: 10.25205/2541-9447-2022-17-1- 2
- [3] A.A. Bryazgin, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, Industrial electron accelerators developed at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk, Russian Academy of Sciences*, **61**, 601, 2018; doi: 10.3367/ufne.2018.03.038344
- [4] E.V. Domarov, D.S. Vorobyov, M.G. Golkovsky, Yu.I. Golubenko, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavrukhin, P.I. Nemytov, R.A. Salimov, A.V. Semenov, A.V. Sorokin, S.N. Fadeev, I.K. Chakin, V.G. Cherepkov, Research of Parameters of the Powerful Electron Beam of Industrial Accelerator ELV, *Sib. Fiz. Zh.*, **14**(2), 5, 2019; doi: 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20
- [5] М.Г. Голклевский, “Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума” *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2013