

Научная статья

УДК 621.384.658

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

## Новейшие модели ускорителей ЭЛВ с энергией до 4 МэВ\*

Денис Сергеевич Воробьев<sup>1</sup>, Николай Константинович Куксанов<sup>2</sup>  
Евгений Вадимович Домаров<sup>3</sup>, Юрий Иванович Голубенко<sup>4</sup>  
Алексей Иванович Корчагин<sup>5</sup>, Рустам Абельевич Салимов<sup>6</sup>  
Сергей Николаевич Фадеев<sup>7</sup>, Иван Константинович Чакин<sup>8</sup>  
Алексей Вячеславович Семенов<sup>9</sup>, Александр Владимирович Лаврухин<sup>10</sup>  
Юлия Эдуардовна Потапова<sup>11</sup>

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

<sup>1</sup>d.s.vorobev@inp.nsk.su

<sup>2</sup>n.k.kuksanov@inp.nsk.su

<sup>3</sup>e.v.domarov@inp.nsk.su

<sup>4</sup>yu.i.golubenko@inp.nsk.su

<sup>5</sup>a.i.korchagin@inp.nsk.su

<sup>6</sup>r.a.salimov@inp.nsk.su

<sup>7</sup>s.n.fadeev@inp.nsk.su

<sup>8</sup>i.k.chakin@inp.nsk.su

<sup>9</sup>a.v.semenov@inp.nsk.su

<sup>10</sup>a.v.lavrukhin@inp.nsk.su

<sup>11</sup>yu.e.potapova@inp.nsk.su

### Аннотация

В статье рассматриваются новые модели ускорителей серии ЭЛВ: ЭЛВ-15 с максимальной энергией до 3 МэВ, ЭЛВ-16 с максимальной энергией до 4 МэВ, ускоритель ЭЛВ-18 с энергией до 2 МэВ, и модификация ускорителя ЭЛВ-4Б. Даны детали процесса проектирования, расчета и тестирования. Рассматриваются особенности эксплуатации и вывода на рабочие параметры. Помимо этого, уделяется внимание текущему состоянию дел, связанных с ускорителями электронов серии ЭЛВ: разработкой, исследованиями, применением и поставками.

### Ключевые слова

ускоритель электронов, ЭЛВ, радиационная модификация, сшивка полимеров, промышленный ускоритель

### Для цитирования

Воробьев Д. С., Куксанов Н. К., Домаров Е. В., Голубенко Ю. И., Корчагин А. И., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Чакин И. К., Семенов А. В., Лаврухин А. В., Потапова Ю. Э. Новейшие модели ускорителей ЭЛВ с энергией до 4 МэВ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 80–87. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

---

\*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

## Newest ELV Type Accelerators with up to 4 MeV Energy

Denis S. Vorobev<sup>1</sup>, Nikolay K. Kuksanov<sup>2</sup>  
Evgeny V. Domarov<sup>3</sup>, Yuri I. Golubenko<sup>4</sup>  
Aleksey I. Korchagin<sup>5</sup>, Rustam A. Salimov<sup>6</sup>  
Sergey N. Fadeev<sup>7</sup>, Ivan K. Chakin<sup>8</sup>  
Aleksey V. Semenov<sup>9</sup>, Alexander V. Lavrukhin<sup>10</sup>  
Yulia E. Potapova<sup>11</sup>

Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup>d.s.vorobev@inp.nsk.su

<sup>2</sup>n.k.kuksanov@inp.nsk.su

<sup>3</sup>e.v.domarov@inp.nsk.su

<sup>4</sup>yu.i.golubenko@inp.nsk.su

<sup>5</sup>a.i.korchagin@inp.nsk.su

<sup>6</sup>r.a.salimov@inp.nsk.su

<sup>7</sup>s.n.fadeev@inp.nsk.su

<sup>8</sup>i.k.chakin@inp.nsk.su

<sup>9</sup>a.v.semenov@inp.nsk.su

<sup>10</sup>a.v.lavrukhin@inp.nsk.su

<sup>11</sup>yu.e.potapova@inp.nsk.su

### Abstract

The article represents new models of accelerators of the ELV series: ELV-15 with a maximum energy of up to 3 MeV, ELV-16 with a maximum energy of up to 4 MeV, an ELV-18 accelerator with an energy of up to 2 MeV, and a modification of the ELV-4 accelerator – ELV-4B. Details of the design, calculation and testing process are given. Features of operation and accelerators conditioning are considered. Attention is paid to the current state of development, research, application of ELV accelerators series.

### Keywords

electron beam, accelerator, ELV, radiation processing, polymer crosslinking, industrial accelerator, DC accelerator

### For citation

Vorobev D. S., Kuksanov N. K., Domarov E. V., Golubenko Yu. I., Korchagin A. I., Salimov R. A., Fadeev S. N., Chakin I. K., Semenov A. V., Lavrukhin A. V., Potapova Yu. E. Newest ELV Type Accelerators with up to 4 MeV Energy. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 80–87 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

## Введение

В 2023 г. исполнилось 50 лет с момента принятия межведомственной государственной комиссией ускорителя ЭЛВ-1, которая рекомендовала их к промышленному применению и массовому производству. За это время ускорители ЭЛВ прошли через множество модернизаций, разработку новых моделей, новых применений. И спустя полвека этот процесс продолжается и сегодня. Основной запрос со стороны пользователей ускорителей ЭЛВ – это увеличение энергии пучка ускоренных электронов. В ответ на него ИЯФ разработал и выпустил на рынок ускоритель ЭЛВ-15 с энергией до 3 МэВ и мощностью 100 кВт, а также в активной фазе находится разработка и производство ускорителя ЭЛВ-16 с максимальной энергией до 4 МэВ. Не остается в стороне и вопрос надежности эксплуатации ускорителей. Несмотря на то что ускорители серии ЭЛВ и так считаются одними из самых надежных машин в своем классе и области применения, обеспечивая непрерывную работу производственных линий в режиме 24/7, в Институте разрабатываются такие модели ускорителей, как ЭЛВ-18 (модификация ЭЛВ-8, с уменьшенной до 2 МэВ максимальной энергией, увеличенным до 67 мА током, и до 120 кВт мощностью) и ЭЛВ-4Б (1,5 МэВ, 67 мА, 100 кВт). Обе модели имеют разгруженный, с точки зрения высоковольтной прочности, выпрямитель, что еще больше повышает их надежность.

## ЭЛВ-15

Разработка ускорителя ЭЛВ-15 началась в 2019 г., в 2020 г. началось изготовление, а в 2021 г. первый ускоритель был собран на испытательном стенде в Институте ядерной физики в Новосибирске, а в декабре отправлен первому заказчику в Китай [1].

В качестве исходной модели был взят ускоритель ЭЛВ-8. Сосуд имеет схожую коническую геометрию, как и первичная обмотка. Измерение энергии производится роторным вольтметром. Оптика пучка – стандартная для всей серии ускорителей ЭЛВ с возможностью установки выпускных устройств различных размеров (с шириной до четырех метров вдоль выпускного окна), а также комплектацией четырехсторонней и кольцевыми системами облучения.

## Расчет

Впервые для расчета физических и геометрических параметров выпрямителя (размеры, количество витков первичной и вторичной обмоток, количество секций и пр.) мы применили метод параметрической экстраполяции, предположив, что сравнение расчетов, проведенных одним и тем же способом, параметров нового генератора и существующего аналогичного устройства значительно упростит процесс моделирования при сохранении достаточной точности. Само моделирование и сопутствующие ему расчеты были опубликованы в статье [2] и приводить их здесь будет излишним. Тем не менее хотелось бы отметить, что связка программного обеспечения SAM [3] и NL5 в очередной раз показала себя как замечательный инструмент для подобного рода моделирований.

По итогу расчетов было принято: высота первичной обмотки (состоящей из двух частей) – 3600 мм, количество секций вторичной обмотки – 80 (плюс три «пустые секции», состоящие только из экранов, без катушки), количество витков первичной обмотки – 33 (17 – нижняя часть и 16 – верхняя), количество витков катушки секции – 3000. Непосредственно ускорительная трубка состоит из четырех частей длиной 900 мм, с электронной пушкой, выполненной по схеме Пирса наверху и LaB6 катодом диаметром 10 мм.

Таблица 1

Параметры ускорителя ЭЛВ-15

Table 1

ELV-15 accelerator parameters

| Параметр               | Значение |
|------------------------|----------|
| Максимальная энергия   | 3,0 МэВ  |
| Минимальная энергия    | 1,5 МэВ  |
| Максимальный ток пучка | 50 мА    |
| Мощность               | 100 кВт  |
| Пульсации энергии      | 2,5 %    |

## Тестирование

В 2021 г. производство компонентов ЭЛВ-15 было завершено, после чего сразу началась сборка на одном из стендов лаборатории в ИЯФ и, наконец, в третьем квартале того же года ускоритель был впервые запущен. Первые же включения оказались весьма обнадеживающими, поскольку благодаря «затвору» (созданию потенциальной «ямы» на первых электродах ускоряющей трубки), используемому практически на всех машинах, ускоритель менее чем за два дня вышел на свои предельные параметры, практически не потребовав процесса тренировки

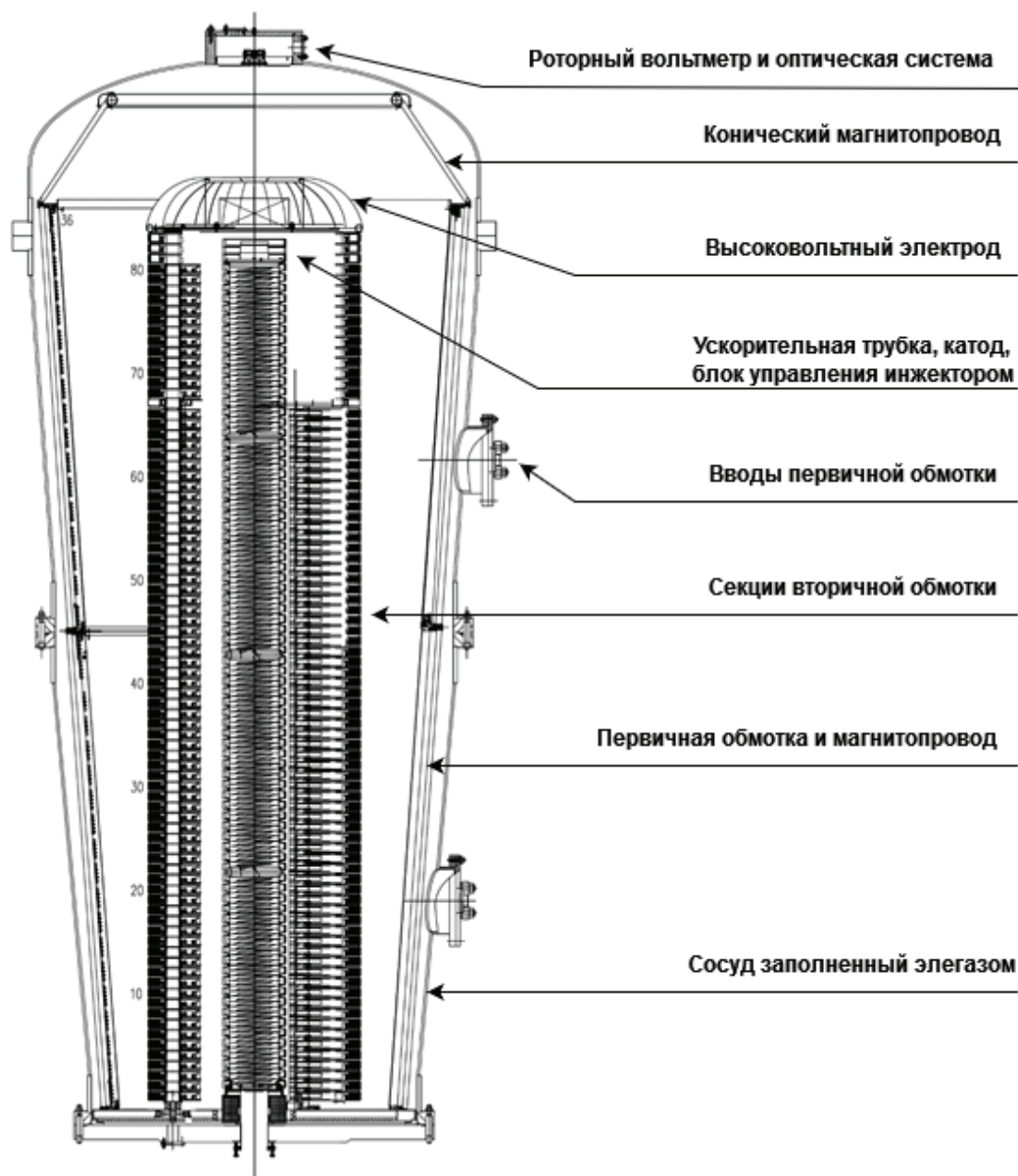


Рис. 1. Ускоритель ЭЛВ-15 (без системы вывода пучка в атмосферу)

Fig. 1. ELV-15 accelerator (without extraction device)

высоковольтных вакуумных зазоров, после чего в течение двух месяцев работал на максимальной энергии мощности и токе.

Стоит отметить, что в процессе тестирования была достигнута максимальная энергия 3.4 МэВ, в очередной раз подтвердив правильность расчетов и надежность полученного выпрямителя.

### Особенности ускорителя

Диаметр первичной обмотки был увеличен за счет увеличения диаметра выпрямительной секции и высоковольтного зазора в верхней части выпрямителя (из-за возросшего напряжения и желания уменьшить напряженность). В свою очередь это привело к увеличению индуктивно-

сти рассеяния первичной обмотки. Во время первых запусков мы обнаружили, что индуктивности согласующего дросселя недостаточно для получения максимальной мощности во всем диапазоне энергий. Были предложены три варианта в качестве решения возникшей проблемы: а) установить дополнительную схему, которая бы подключала дополнительные емкости к схеме согласования; б) сделать переключаемой частоту преобразователя частоты; в) изготовить дроссель с большей индуктивностью. Несмотря на то что у нас уже есть успешный опыт эксплуатации схем, подключающих дополнительные емкости, было решено доработать схемы и программное обеспечение до возможности переключения частоты инвертора на IGBT-транзисторах, а также изготовить новый дроссель. Позже было установлено: разница в частотах составляет около 12 %, т. е. на нижних энергиях ускоритель работает с частотой меньшей, чем на высоких (рабочая частота 400...500 Гц).

По итогам эксплуатации оказалось, что использование дросселя с увеличенной индуктивностью наиболее рационально, хотя схемная и программная реализация переключения частоты были сохранены в составе системы для возможных будущих ускорителей большой мощности и широким диапазоном энергии.

Первый ускоритель был отправлен заказчику осенью 2021 г. и в четвертом квартале того же года был собран, запущен, выведен на рабочие параметры и передан в эксплуатацию. На сегодняшний день уже поставлено 5 таких ускорителей.

### ЭЛВ-18 и ЭЛВ-4Б

Из-за возросшей производительности линий (производство кабеля различных типов, термоусаживаемых трубок, вспененного полиэтилена), в современных производствах число незапланированных отключений ускорителя должно быть минимизировано не более одного за 8 часов работы. Под отключениями здесь подразумеваются отключения, связанные со срабатываниями блокировок и защит систем ускорителя: прохождение пучка, работа оптики пучка, работа высоковольтного выпрямителя, системы питания. В них не входят причины, связанные с внешними вспомогательными системами, такими как водяное охлаждение, воздушное охлаждение, вытяжка озона и пр. Для сравнения: 20 лет назад допустимым считалось одно отключение ускорителя за 2 часа. Сейчас же требования стали гораздо строже.

Помимо вышесказанного, производительность напрямую зависит от мощности дозы получаемой продукции, которая, в свою очередь, прямо пропорционально связана с током пучка. Повышение максимального тока и мощности ускорителей напрямую увеличивает производительность линий.

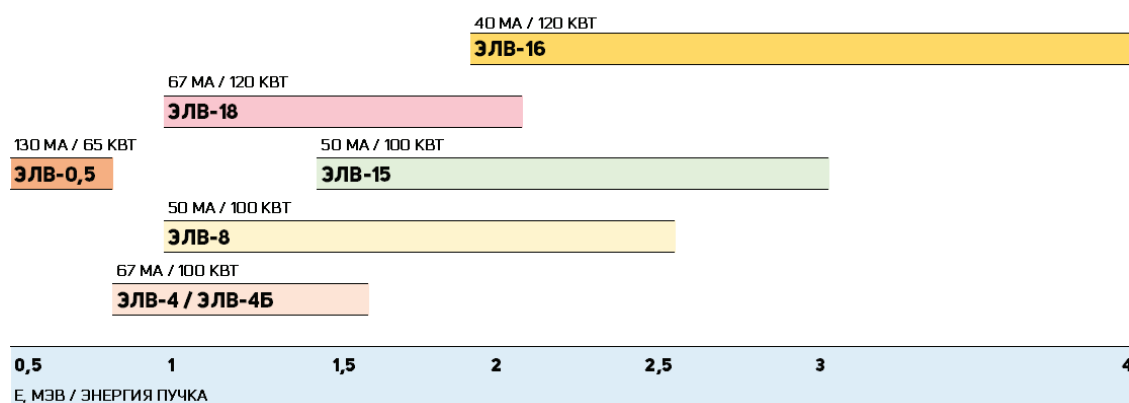


Рис. 2. Диапазоны энергии ускорителей ЭЛВ

Fig. 2. ELV accelerators energy ranges

### ЭЛВ-18

Ускоритель ЭЛВ-18 является овековеченным опытом эксплуатации ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-4. Зачастую для сшивки (полимеризации) изоляции кабельной продукции средних сечений наиболее оптимальная энергия лежит в диапазоне 1,62,0 МэВ. Если раньше перекрытие этого диапазона было возможно только с применением ускорителей ЭЛВ-8 или ЭЛВ-15, то теперь мы можем предложить ускоритель с повышенной мощностью в 120 кВт и максимальным током в 67 мА. По сравнению с ускорителем ЭЛВ-8 в ЭЛВ-18 количество секций уменьшено до 58, а ускорительная трубка короче на 30 см.

### ЭЛВ-4Б

Ускорители ЭЛВ-4 считаются одними из самых массовых, являясь «рабочей лошадкой» для производства термоусаживаемой трубки, поскольку большая часть производства таких трубок приходится на небольшие диаметры, с малой толщиной стенки, большой энергии не требуют. Для повышения надежности и качества эксплуатации было предложено изменить геометрию высоковольтного выпрямителя.

Изменения затронули верхний и нижний диаметры первичной обмотки и число ее витков. Верхний диаметр увеличен для повышения высоковольтной прочности, нижний для облегчения доступа к секциям вторичной обмотки во время сборки и сервисного обслуживания (на основе опыта), количество витков уменьшено с 33 до 32 для выравнивания поля вдоль оси. Это привело к уменьшению напряженности поля (особенно в высоковольтной части) и, соответственно, к увеличению высоковольтной прочности, надежности и качества эксплуатации ускорителя. Моделирование проводилось в программе WinSAM, и в ближайшем времени отчет будет опубликован в виде статьи и постера на одной из конференций.

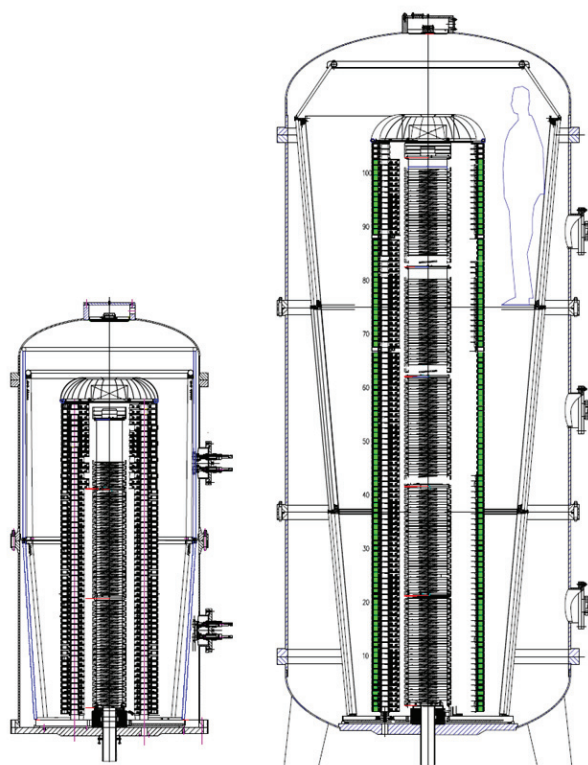


Рис. 3. Ускорители ЭЛВ-18 (слева) и ЭЛВ-16 (справа)

Fig. 3. ELV-18 (on left side) and ELV-16 (on right)



## ЭЛВ-16

Логичным шагом, после создания ускорителя ЭЛВ-15, стало проектирование ускорителя с максимальной энергией 4 МэВ. Пучки таких энергий дают возможность еще больше расширить сферу применения ускорителей ЭЛВ, позволив более широко включить такие области, как, например, стерилизация изделий и продуктов питания, установка гамма-конвертеров в качестве мишени, и, конечно, радиационная сшивка кабельной продукции с изоляцией больших размеров, или вспененного полиэтилена большей толщины.

Модель, получившая название ЭЛВ-16, будет состоять из трех конических первичных обмоток, расположенных в цилиндрическом сосуде (в качестве изоляции по-прежнему используется SF<sub>6</sub>). Вторичная обмотка состоит из секций большего диаметра (по сравнению со стандартными секциями ЭЛВ) в количестве 102 штук плюс три «пустые» секции (без катушки) в верхней части выпрямителя. Ускорительная трубка состоит из 5 частей длиной 90 см, причем апертура и диаметр керамических колец трубки увеличены.

В настоящий момент завершается проектирование узлов ускорителя. Ожидается, что в следующем году начнется производство пилотной модели.

Таблица 2

Параметры ускорителей ЭЛВ-18 и ЭЛВ-16

Table 2

ELV-18 and ELV-16 parameters

| Параметр               | ЭЛВ-18  | ЭЛВ-16  |
|------------------------|---------|---------|
| Максимальная энергия   | 2,0 МэВ | 4,0 МэВ |
| Минимальная энергия    | 1,0 МэВ | 2,0 МэВ |
| Максимальный ток пучка | 67 мА   | 40 мА   |
| Мощность               | 120 кВт | 120 кВт |
| Пульсации энергии      | 2,5 %   | 2,5 %   |

## Заключение

Производство радиационно-сшитой продукции и сферы применения электронных пучков растут с каждым годом. Следуя этим тенденциям и пожеланиям пользователей ускорителей ЭЛВ, Институт ядерной физики занимается разработкой новых моделей ускорителей и улучшением характеристик существующих. Повышение мощности, надежности, расширение диапазона энергий позволят расширить области использования радиационной модификации электронами.

## Список литературы

1. Vorobev D., Domarov E., Kuksanov N. 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. Куksанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н. Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15 // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
3. Тарнецкий В. В., Тиунов М. А., Яковлев В. П. Комплекс программ «SAM». Руководство пользователя. Новосибирск, 2002.

### References

1. **Vorobev D., Domarov E., Kuksanov N., 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. **Kuksanov N. K., Vorobev D. S., Salimov R. A., Fadeev S. N.** The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
3. **Tarnetskiy V. V., Tiunov M. A., Yakovlev V. P.** Complex of programs SAM. User's manual. Novosibirsk, 2002. (in Russ.)

### Сведения об авторах

**Воробьев Денис Сергеевич**, ведущий инженер

**Куксанов Николай Константинович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник

**Домаров Евгений Вадимович**, научный сотрудник

**Голубенко Юрий Иванович**, старший научный сотрудник

**Корчагин Алексей Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

**Салимов Рустам Абельевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник

**Фадеев Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией

**Чакин Иван Константинович**, инженер-исследователь

**Семенов Алексей Вячеславович**, научный сотрудник

**Лаврухин Александр Владимирович**, ведущий инженер

**Потапова Юлия Эдуардовна**, старший лаборант

### Information about the Authors

**Denis S. Vorobev**, Lead Engineer

**Nikolay K. Kuksanov**, Doctor, Chief Researcher

**Evgeny V. Domarov**, Researcher

**Yuri I. Golubenko**, Senior Researcher

**Aleksey I. Korchagin**, PhD, Senior Researcher

**Rustam A. Salimov**, Doctor, Chief Researcher

**Sergey N. Fadeev**, PhD, Laboratory Head

**Ivan K. Chakin**, Engineer-Researcher

**Aleksey V. Semenov**, Researcher

**Alexander V. Lavrukhin**, Lead Engineer

**Yulia E. Potapova**, Senior Laboratory Assistant

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023;  
принята к публикации 20.02.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023;  
accepted for publication 20.02.2024*