

**М. И. БАРАНОВ**, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
**Н. В. ВЕСЕЛОВА**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## **УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ «ХФТИ» – СРЕДОТОЧИЕ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОФИЗИКИ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Приведены краткие научно-исторические данные, показывающие важную роль техники и электрофизики высоких и сверхвысоких электрических напряжений при разработке и создании в Харьковском физико-техническом институте мощных линейных ускорителей протонов, электронов и ионов.

**Ключевые слова:** ускорители заряженных частиц, протоны, электроны, ионы, сильное электрическое поле, высокое и сверхвысокое электрическое напряжение.

**Введение.** Результаты расчетных оценок и физических экспериментов показывают, что для осуществления в веществе большинства ядерных реакций требуются ускоренные до огромных скоростей ионы и основные элементарные частицы (отрицательно заряженные относительно «легкие» электроны массой покоя  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг, положительно заряженные «тяжелые» протоны массой  $m_p = 1836 m_e$  и получаемые с помощью непосредственной бомбардировки ими ряда «тяжелых» химических элементов электрически нейтральные «тяжелые» нейтроны массой  $m_n = 1839 m_e$ ) [1]. В истории развития мировой физики так сложилось, что роль физико-технических устройств, разгоняющих в высоком вакууме указанные заряженные частицы вещества до требуемых скоростей (энергий), стали выполнять специальные сложные и дорогостоящие крупногабаритные радиоэлектронные устройства высокого и сверхвысокого электрического напряжения – ускорители заряженных частиц (УЗЧ) [1,2]. По физическому принципу работы любой УЗЧ практически аналогичен работе гигантской высоковольтной электровакуумной лампы, содержащей изолированные друг от друга металлические электроды, на которые в необходимый момент времени подается ускоряющее заряженную частицу высокое (сверхвысокое) электрическое напряжение [2]. За счет создания в вакууме между ускоряющими электродами УЗЧ сильного электрического поля с напряженностью не менее  $10^5$  В/м и возникновения за счет ее действия на заряженную частицу электрической силы именно и происходит ее ускорение. При этом энергия электрического поля преобразуется в кинетическую энергию частицы, направляемой на ядерную мишень. В этом случае необходимо не забывать о том, что ускоряемые заряженные элементарные частицы являются квантовыми объектами, обладающими одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. Как видим, в основе функционирования УЗЧ

© М. И. Баранов, Н. В. Веселова, 2013

лежат фундаментальные электрофизические принципы, базирующиеся на законах классической и квантовой физики. История создания УЗЧ свидетельствует о том, что при их конструировании специалистами используются самые передовые на соответствующий исторический момент времени научные физические и технические знания человечества и передовые технологии [3,4]. На наш взгляд, определенный интерес представляет задача об установлении тесной взаимосвязи высоковольтной техники и УЗЧ. Проследим эту взаимосвязь на примере работ в области УЗЧ Украинского физико-технического института (УФТИ).

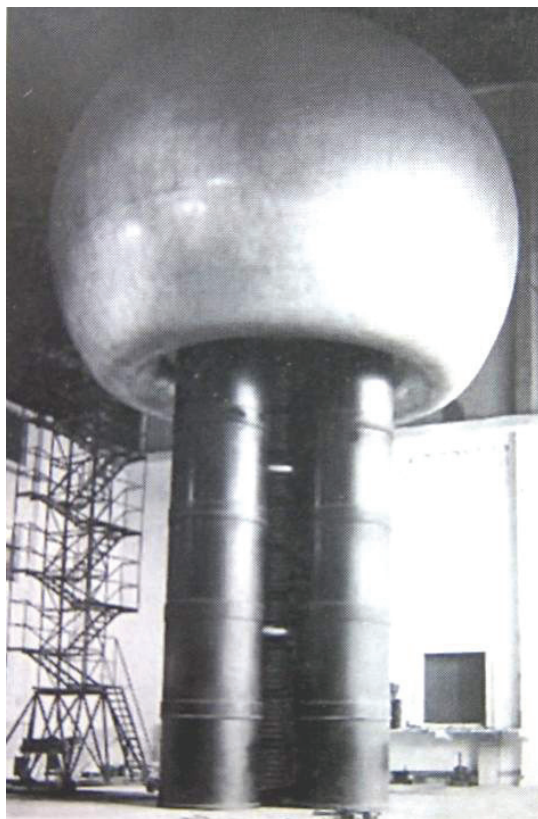


Рисунок 1 – Внешний вид крупнейшего в довоенной Европе электростатического ускорителя протонов типа ЭСУ-3,5 на их энергию от 3,5 до 7 МэВ с вертикальной вакуумной ускорительной трубкой длиной 15 м и электрическим потенциалом металлического шарообразного кондуктора диаметром 10 м до 5 МВ (УФТИ, 1936 год) [5]

**1 Первоначальный этап создания в УФТИ линейных УЗЧ.** На рис. 1 приведен общий вид электростатического ускорителя (ЭСУ) типа ЭСУ-3,5 [5].

Напомним читателю, что УФТИ был создан в 1928 году специальным постановлением Совнаркома СССР [4,5]. Именно УФТИ и стал научным центром по развитию в СССР высоковольтной ускорительной техники. Уже со второй половины 1931 года в УФТИ были начаты работы по созданию научно-технической базы для проведения экспериментов в области ядерной физики с помощью заряженных частиц, искусственно ускоренных сильным электрическим полем. Важным событием в истории УФТИ следует считать 17 октября 1934 года, когда дирекцией этого института был издан приказ «Об организации работ по сооружению экспериментального генератора Ван де Граафа на 7 МэВ» [5,6]. На основании этого приказа в 1936 году в УФТИ под научным руководством будущих академиков АН УССР Антона Карловича Вальтера (1905-1965 гг.) и Кирилла Дмитриевича Синельникова (1901-1966 гг.) впервые в Европе был сооружен электростатический ускоритель протонов на основе использования генератора по электрической схеме выдающегося американского физика Роберта Ван де Граафа (1901-1967 гг.) [4] на их энергию от 3,5 до 7 МэВ (ЭСУ-3,5) с шаровым кондуктором (металлическим электродом) диаметром 10 м (см. рис. 1) [3,6]. Постоянный электрический потенциал этого генератора достигал до 5 МВ [4,5]. На ускорителе ЭСУ-3,5 только в 1937 году был выполнен большой комплекс ядерных исследований по изучению взаимодействия ускоренных протонов с твердым веществом. На основе материалов этих исследований Вальтером А.К. была защищена докторская диссертация [5,6]. Отметим и то, что в УФТИ на основе собственных разработок к концу 1950 года был создан электростатический ускоритель протонов на энергию до 5 МэВ типа ЭСУ-5 (рис. 2). Электрический потенциал высоковольтного металлического кондуктора ЭСУ-5 достигал до 3 МВ [5,7]. Заметим, что в период 1950-1960 гг. на электростатическом ускорителе ЭСУ-5 в УФТИ был выполнен огромный объем ядерно-физических исследований [5,7].

В послевоенные годы, начиная практически с 1946 года, в УФТИ был выполнен большой комплекс работ по высокочастотным генераторам электромагнитных волн, необходимым для линейных УЗЧ [8,9]. В 1952-1954 гг. на основе результатов этих работ под научным руководством д-ра физ.-мат. наук Гришаева И.А. в УФТИ был создан первый линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на бегущей электромагнитной волне с замедляющей системой типа волновода на энергию до 0,7 МэВ и затем вскоре до 3,5 МэВ [5,8]. В течение 1950-х годов в УФТИ был создан ряд линейных ускорителей протонов (ЛУП) на энергию 5,5 МэВ (ЛУП-5,5) и 8 МэВ (ЛУП-8), выполняющих роль инжектора для циклических УЗЧ – синхрофазотронов [5]. Укажем, что в 1956 году в УФТИ под научным руководством Синельникова К.Д., Вальтера А.К. и Гришаева И.А. был построен ЛУЭ на энергию электронов до 30 МэВ (ЛУЭ-30), который состоял из двух взаимосвязанных между собой секций – инжекторной секции и основной ускоряющей высоковольтной секции [7,10]. Кроме того, в 1958 году в УФТИ этими учеными был создан ЛУЭ на энергию

90 МэВ (ЛУЭ-90), на котором были выполнены исследования по фотоядерным реакциям [5,7].

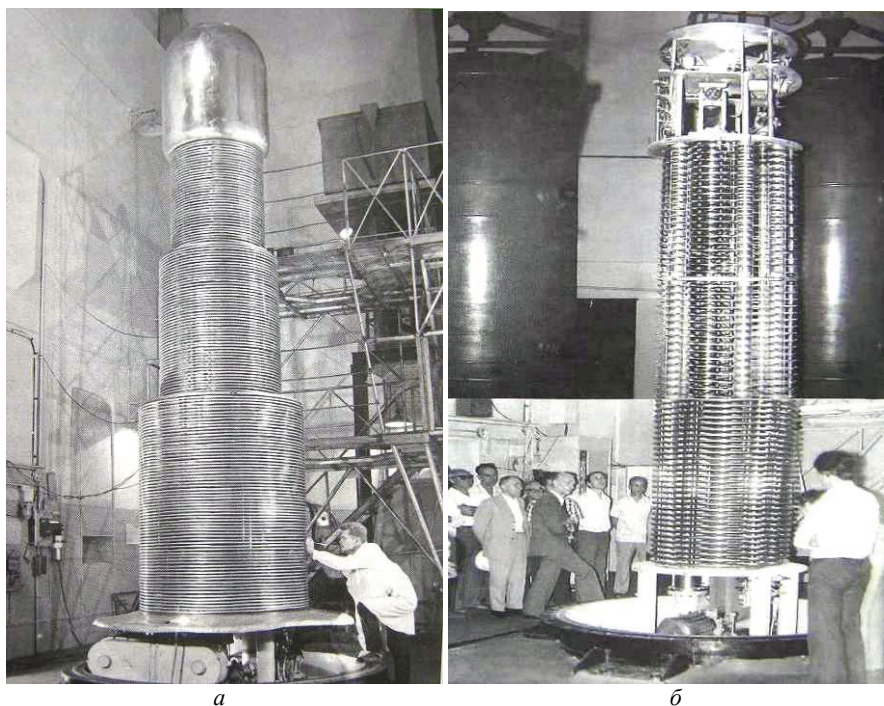


Рисунок 2 – Внешние виды электростатического ускорителя протонов типа ЭСУ–5 (потенциал на кондукторе – до 3 МВ; ток пучка – до 50 мкА; давление газа ( $N_2 + 5\% SF_6$ ) в котле – до 6 атм.; давление вакуума в ускорительной трубке –  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.): а – колонны ускорителя без корпуса-котла и двух промежуточных экранов (УФТИ, 1954 год); б – колонны ускорителя после его реконструкции (УФТИ, 1968 год; первый слева – чл.-корр. АН УССР Хижняк Н.А., пятый – чл.-корр. АН СССР Иванов В.Е.) [5]

В 1958 году в УФТИ АН УССР благодаря самоотверженной работе многих его сотрудников, включая Зейдлица П.М., Болотина Л.И., Ильевского С.А., Ревуцкого Е.И. и Бомко В.А., с использованием ряда оригинальных высоковольтных устройств был построен линейный ускоритель тяжелых многозарядных ионов типа «ЛУМЗИ», общий вид которого показан на рис. 3 [5,11]. Отметим то немаловажное обстоятельство, что с использованием этого типа УЗЧ для тяжелых многозарядных ионов в настоящее время в данном институте продолжают работы по совершенствованию ускоряющих структур, разработке, исследованию и внедрению новых перспективных методов ускорения заряженных частиц. Сейчас на реконструированном ускорителе тяжелых ионов типа «ЛУМЗИ» харьковскими учеными совместно с их зарубеж-

ными коллегами отрабатываются новые прикладные и фундаментальные направления для ядерно-физических исследований в области радиационного материаловедения (например, изучение пластических характеристик конструкционных материалов после их облучения пучком ионов, исследование трековых (ядерных) мембран и производства радионуклидов для медицинских целей) и ядерной физики (например, изучение взаимодействия тяжелых ионов) [5,11].

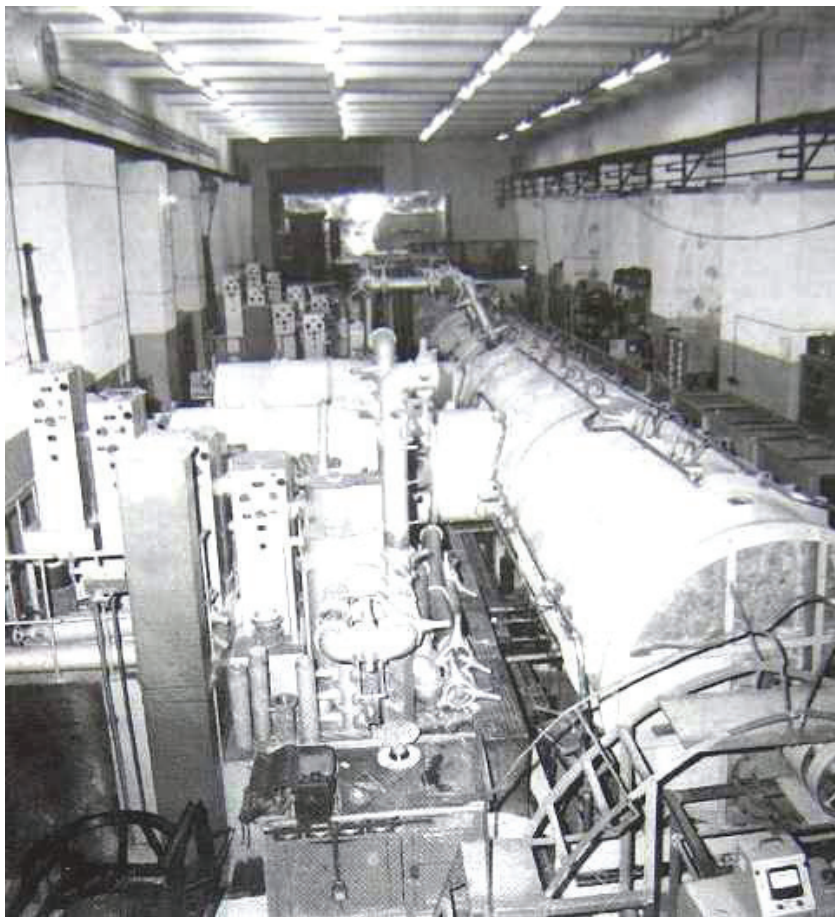


Рисунок 3 – Внешний вид линейного ускорителя тяжелых многозарядных ионов типа «ЛУМЗИ» на энергия до 8 МэВ/нуклон и импульсный ток пучка ионов азота до 50 мкА (УФТИ, 1958 год) [5,11]

В 1965 году в УФТИ АН УССР был построен крупнейший в свое время в Европе 50-ти секционный линейный ускоритель электронов на энергию до

2 ГэВ (ЛУЭ-2000), фрагмент которого приведен на рис. 4. Этот сверхмощный ускоритель электронов остался крупнейшим ЛУЭ на территории СССР [5,8].

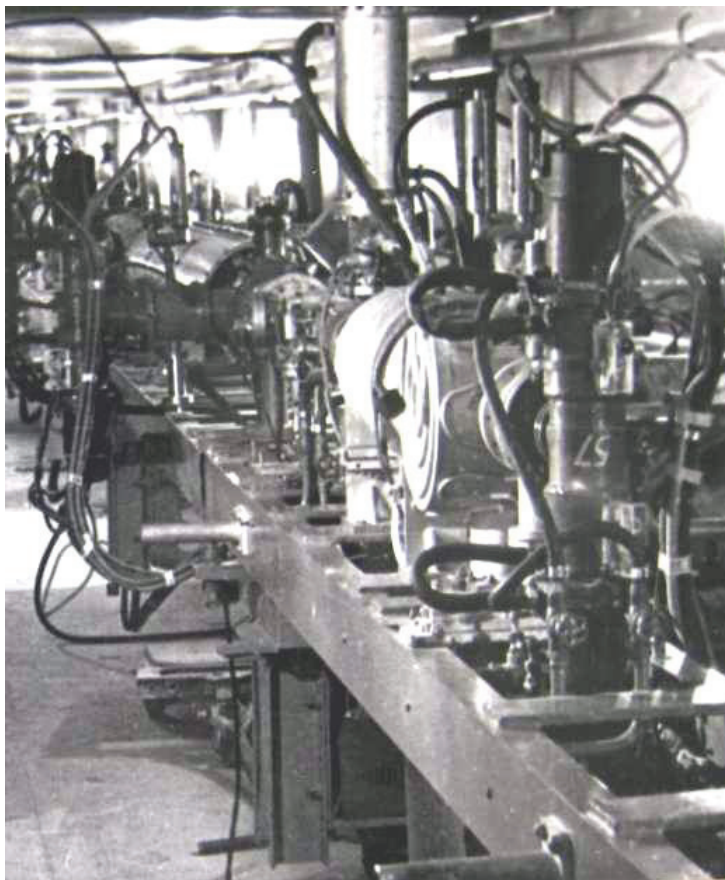


Рисунок 4 – Внешний вид фрагмента крупнейшего в 1960-х годах в Европе сверхмощного 50-ти секционного линейного ускорителя электронов типа ЛУЭ-2000 на энергию этих элементарных частиц до 2 ГэВ и импульсный ток электронного пучка до 100 мА при длительности его импульса – 1,5 мкс (УФТИ, 1965 год) [5,8]

**2 Современный этап создания в ХФТИ линейных УЗЧ.** В 1987 году для решения ряда прикладных и фундаментальных задач в области физики высоких энергий и ядерной физики, а также для разработки новых радиационных технологий в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ, бывшем УФТИ) АН УССР был построен малогабаритный линейный ускоритель электронов типа ЛУЭ-10 на энергию ускоряемых частиц (8–18) МэВ (рис. 5) [5]. Данный ускоритель использовался для проведения фундамен-

тальных и прикладных исследований в области радиационных повреждений различных материалов и отработки новых технологий радиационного назначения [5,13].



Рисунок 5 – Внешний вид малогабаритного линейного ускорителя электронов типа ЛУЭ-10 на энергию данных элементарных частиц до 18 МэВ и импульсный ток электронного пучка до 1 А при длительности его импульса –3,5 мкс (ХФТИ, 1987 год) [5]

В 1993 году в ХФТИ АН Украины был создан малогабаритный технологический ускорительный комплекс (КУТ) с вертикальной установкой ускорительной вакуумной трубки на энергию генерируемого им пучка электронов до 9 МэВ для отработки перспективных промышленных радиационных технологий (рис. 6) [5]. Далее в 1999 году для решения ряда прикладных задач и разработки новых радиационных технологий в Национальном научном центре (ННЦ) «ХФТИ» НАН Украины был построен малогабаритный линейный ускоритель электронов типа ЛУЭ-20 «ЭПОС» на энергию электронов до (20–35) МэВ [5]. В 2002 году для решения некоторых актуальных прикладных задач и разработки перспективных радиационных технологий учеными ННЦ «ХФТИ» НАНУ был разработан и построен компактный линейный ускоритель КУТ-20 на энергию электронов до (20–30) МэВ и импульсный ток электронного пучка до 1 А [5]. В последние годы в рамках международного сотрудничества с Юлихским научным центром (Германия) ННЦ «ХФТИ» НАНУ для проведения совместных ядерных исследований в области радиационного материаловедения был передан электростатический ускоритель «ELIAS» [5,13], общий вид основных элементов которого приведен на рис. 7. Большой вклад в приобретение, монтаж и запуск в эксплуатацию в ННЦ «ХФТИ» НАНУ этого современного ускорителя внесли директор Института

физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ «ХФТИ» НАНУ, чл.-корр. НАН Украины, проф. Довбня Анатолий Николаевич, генеральный директор ННЦ «ХФТИ» НАНУ, академик НАН Украины, проф. Неклюдов Иван Матвеевич и другие харьковские ученые и специалисты в области экспериментальной и ядерной физики.

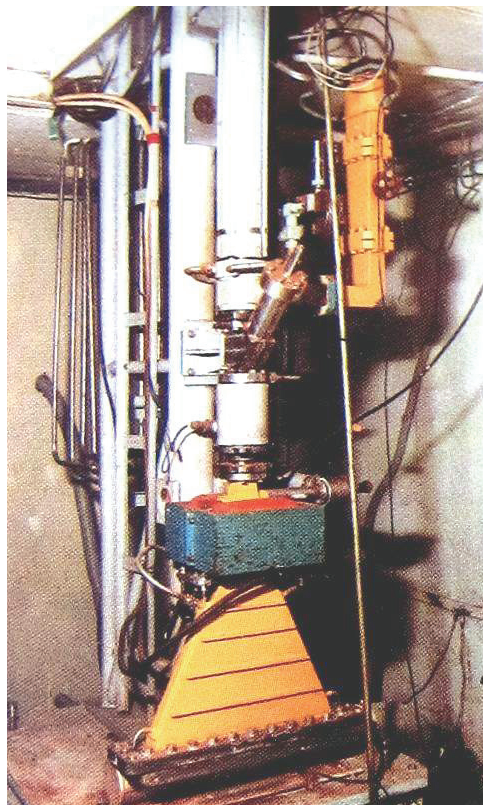


Рисунок 6 – Внешний вид малогабаритного ускорителя электронов типа КУТ с вертикальной установкой ускорительной трубки (энергия элементарных частиц – до 9 МэВ; импульсный ток – до 0,8 А при длительности импульса – 4 нс; ХФТИ, 1993 год) [5,8]

В настоящее время в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины (точнее в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения, возглавляемом д-ром физ.-мат. наук Егоровым Алексеем Михайловичем) активно проводятся работы по радикальному усовершенствованию линейных УЗЧ [14]. Здесь были разработаны и созданы ускорители протонов и ионов с использованием переменного-фазовой фокусировки, отмеченные в 1996 году Государственной премией Украины в области науки и техники [14]. Именно в этом институте



совместно с российскими учеными было разработано новое направление в физике ускорителей – коллективные методы ускорения частиц [14]. В рамках этого нового направления в ускорении элементарных частиц в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины был разработан ряд мощных СВЧ-генераторов и новых типов ускоряющих структур, объединивших в себе преимущества традиционных вакуумных структур и плазменных систем. Здесь было создано семейство сильноточных ускорителей электронов с энергией до 1 МэВ и импульсными токами до 100 кА [14].



Рисунок 7 – Внешний вид основных элементов электростатического ускорителя заряженных элементарных частиц типа «ELIAS» (ННЦ «ХФТИ», 2010 год) [5,6,13]

На основе импульсных сильноточных релятивистских ускорителей электронов в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины в последние годы был создан ряд сверхмощных СВЧ-генераторов в широком диапазоне частот мощностью до 1 ГВт (релятивистские карсинотроны, магнетроны, виркаторы и убитроны) [14].

В ННЦ «ХФТИ» НАН Украины одной из последних разработок в области физики высоких энергий и УЗЧ является исследовательская ядерная установка «Источник нейтронов, основанный на подкритической урановой сборке, управляемой линейным ускорителем электронов» [15]. Эта установка создается в настоящее время на производственной территории ННЦ «ХФТИ» совместно с Аргонской национальной лабораторией (США) и Институтом физики высоких энергий (Китай). Первичный поток нейтронов в ней образуется в результате фотоядерных реакций в ядерной мишени из вольфрама или природного урана, бомбардируемой внешним от ЛУЭ интенсивным электронным пучком мощностью до 100 кВт при энергии ускоренных электронов до 100 МэВ [15]. Данный мощный источник нейтронов предназначен для научных и прикладных совместных исследований отечественных и зарубежных специалистов в области ядерной физики, физики конденсированного состояния вещества, радиационного материаловедения, биологии, производства медицинских радионуклидов и трансмутации различных радионуклидов [15].

**Выводы.** Показана важная физико-техническая роль техники высоких и сверхвысоких постоянных и импульсных электрических напряжений при разработке и создании мощных сильноточных линейных УЗЧ. Отмечен значительный вклад научной школы ХФТИ НАНУ в развитие отечественной высоковольтной ускорительной техники, физики высоких энергий и ядерной физики.

**Список литературы:** 1. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с. 3. Иванов И.Н., Лебедев А.Н. Введение в теорию ускорителей. Ускорители заряженных частиц – от В.И. Векслера до наших дней. – М.: Наука, 2001. – С. 133–146. 4. Храмов Ю.А. История физики. – К.: Феникс, 2006. – 1176 с. 5. Айзацкий Н.И., Аркатов Ю.М., Бомко В.А. и др. Харьковский физико-технический институт – колыбель ядерной физики и ускорителей заряженных частиц в СССР. К 70-летию расщепления атомного ядра (1932-2002 гг.) / Под общей ред. проф. Довбни А.Н. – Х.: 2002. – 43 с. 6. Таньшина А.В. Основатели Харьковских научных школ в физике. Учеб. пособие по истории физики. Ч.1. – Х.: Изд-во Харьков. Нац. ун-та им. В.Н. Каразина, 2002. – 512 с. 7. Электростатические генераторы / Сборник статей под ред. А.К. Вальтера. – М.: 1959. – 255 с. 8. Довбня А.Н., Егоров А.М., Ранюк Ю.Н. и др. К пятидесятилетию запуска первого линейного ускорителя электронов в ННЦ «ХФТИ» // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – № 3. – С. 3–5. 9. Толук В.Т. Физика и Харьков // Журнал «Университеты: Наука и просвещение». – 2004. – № 1. – С. 42–53. 10. Электронные ускорители. Труды 3-ей межвузовской конференции. – Томск: 1961. – 419 с. 11. Бомко В.А., Егоров А.М., Зайцев Б.В. и др. Развитие комплекса «ЛУМЗИ» для ядерно-физических исследований // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 3. – С. 100–104. 12. Ранюк Ю.Н., Шевченко О.С. Лаборатория № 1 и атомный проект СССР. Документы и материалы (1938-1956 гг.). – Х.: ННЦ «ХФТИ», 2011. – 370 с. 13. [http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Харьковский\\_физико-технический\\_институт](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Харьковский_физико-технический_институт). 14. <http://www.kipt.kharkov.ua/irpenna.html>. 15. Айзацкий Н.И., Демченко П.А., Неклюдов И.М. и др. Источник нейтронов ННЦ «ХФТИ» // Вопросы атомной науки и техники. – 2012. – № 3. – С. 3–9.

*Поступила в редколлегию 19.09.2013*

УДК 621.3:537.311:910.4

**Ускорители заряженных частиц «ХФТИ» – средоточие техники и электрофизики высоких и сверхвысоких напряжений / М.И. Баранов, Н.В. Веселова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60 (1033). – С. 21-30. – Бібліогр.: 14 назв.**

Приведені короткі науково-історичні дані, що показують важливу роль техніки і електрофізики високої і надвисокої електричної напруги при розробці і створенні в Харківському фізико-технічному інституті потужних лінійних прискорювачів протонів, електронів і іонів.

**Ключові слова:** прискорювачі заряджених частинок, протони, електрони, іони, сильне електричне поле, висока і надвисока електрична напруга.

Short scientifically-historical information, showing the important role of technique and electrophysics of high and over high electric voltage at development and creation in the Kharkov physical-technical institute of the powerful linear accelerating of protons, electrons and ions, is resulted.

**Key words:** accelerating of the charged particles, protons, electrons, ions, strong electric field, high and over high electric voltage.