

УДК 621.384.64

УСКОРИТЕЛИ НА ОБРАТНОЙ ВОЛНЕ КАК АЛЬТЕРНАТИВА КЛАССИЧЕСКИМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ УСКОРИТЕЛЯМ

© А. С. Богомолов, Т. С. Бакиров, П.К. Богданов

aleksbogomol@yandex.ru

ЗАО ФИЗТЕХМЕД, Москва, Россия

Аннотация. В интересах ADS разработаны ЛУ протонов на высокоэффективных линейных структурах комнатной температуры с ярковыраженной обратной пространственной гармоникой ВЧ-эмп, распространяющегося навстречу потоку ускоряемых частиц. Доказывается преимущество УЛОВ ($T=300K$) по общему $\text{кпд}=(P_{\text{пучка}}/P_{AC})$ в сравнении с ускорителями на СП-структурах ($T=2K$). Применение УЛОВ целесообразно в составе комплексов с подкритическими ЯР для пережигания РАО и МА и для производства ЯЭ. В УЛОВ возможен как режим с малой скважностью, так и непрерывный режим.

Ключевые слова: ADS, УЛОВ-BWLAP ($T=300K$), общий $\text{кпд}=(P_{\text{пучка}}/P_{AC})>38\%$.

BWLAP's versa SC-Linacs.

© A.S. Bogomolov, T.S. Bakirov, P.K. Bogdanov

JSC "PHYTECHMED", Moscow, RUSSIA

ABSTRACT

Provides research materials, in order to create ADS – accelerator driven nuclear facility for industrial purpose, on the subject of BWLAP (Backward Wave Linear Accelerator of Particles) applied to the problem of developing a compact proton accelerator on the high-performance linear accelerating structures of the "room-temperature" with a clearly marked backward spatial harmonic of the high-frequency electromagnetic field propagating against the flow of the accelerated particles. It proves the BWLAP (with water cooled accelerator structures) advantage over superconducting accelerators in general efficiency (P_{beam}/P_{AC}) at analogous energy of protons. Application of BWLAP appropriate in the complexes with sub-critical nuclear reactors for transmutation the radioactive waste (RW) and blowing minor actinides, and to produce nuclear energy. The BWLAP can provide as the regime with a low duty cycle and continuous wave operation.

Keywords: ADS, УЛОВ-BWLAP ($T=300K$), Linac Industrial Efficiency ($P_{\text{пучка}}/P_{AC}$) $>38\%$.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна, как никогда, задача жизнеобеспечения Человечества дешевыми и надежными источниками энергии (электричеством и теплом) и избавления от накопленных количеств РАО и страхов, связанных с использованием ядерной энергии.

Атомная энергетика на реакторах с самоподдерживающейся реакцией – то, что имеем, - вызывает настороженное отношение к ней как населения, так и профессионалов. Как результат - отсутствие строительства АЭС на этой технологической основе в странах, прошедших этап становления АЭ. Возрождение и ожидание ускоренного развития АЭ связывают с надеждой на коренные изменения в современной АЭ. С переходом на новую технологическую платформу – на подкритические реакторы на вынужденном делении ядер.

Однако в нашей стране это ожидание с разработкой подкритических реакторов мало связано, - в основном, с реакторами-бридерами.

Контроль, обеспечение работоспособности и безопасности, и управление всеми процессами в подкритических реакторах осуществляют пучками высокоэнергетических протонов. Это кардинальным образом отличает подкритические реакторы от современных реакторов и полностью исключает реактивностные аварии Чернобыльского типа.

Из большого числа публикаций на данную тему процитируем работу J.-P. Revol, опубликованную в УФН в 2003 г. [1], в которой описано положение дел в современной АЭ и предлагается путь перевода АЭ на подкритические технологии. *"Сегодня перед учеными стоит проблема: можно ли изменить процесс производства ядерной энергии таким образом, чтобы сделать его приемлемым для общества? ЯЭ является областью, в которой серьезных фундаментальных НИР не велось с конца 1950-х гг., когда первые гражданские атомные электростанции были введены в эксплуатацию"* и *"Современный уровень технологии ускорителей заряженных частиц позволяет применить протонные ускорители для эффективного производства энергии и уничтожения отходов ядерной энергетики. Усилитель энергии (Energy Amplifier, EA), предложенный Карло Руббиа и его группой⁽¹⁾, представляет собой подкритическую сборку на быстрых нейтронах, управляемую протонным ускорителем. EA может оказаться особенно эффективным при уничтожении трансурановых нуклидов, производимых действующими реакторами"*.

К большому огорчению, в цитируемой статье не содержится ссылок на работы, выполненных до 1990г., а на советские и российские - ссылки полностью отсутствуют. Нет ни Дубовского с Марчуком⁽²⁾, ни Василькова⁽³⁾ с Гольданским⁽⁴⁾, ни Барашенкова⁽⁵⁾.

Всё в тематике подкритических реакторов начинается с новой страницы – с Руббиа.

К сожалению в работе содержится «руководящее и направляющее» утверждение, широко распространенное во всем мировом сообществе разработчиков ускорительной техники и «кочующее» из одной публикации в другую: *«в "теплых" вариантах ЛУ КПД мал, и малая апертура (диаметр канала ускорителя) представляет проблему с точки зрения потерь пучка, которые к тому же не являются локализованными»*.

Именно такого рода утверждение «развернуло» основную массу создателей ЛУ на разработки сверхпроводящих (СП/SC) ускорительных комплексов. Немалую роль сыграли и трудности разработки циклотронов ГэВ-ного уровня энергии протонов с током более 5 мА, смотрившихся как серьезный конкурент ЛУ для применения в индустрии⁽⁶⁾.

Как следствие, с начала 1990-х годов практически исчезли предложения, серьезный анализ и публикации по разработке сверхмощных ЛУ, которые могли бы быть выполнены на линейных ускоряющих структурах комнатной (~300К) температуры.

В [2], 1994 г., сделан вывод (на основе анализа традиционной схемы Gun-RFQ-DTL-high energy section, Zsh=35.4 MOhm/m) о полной неконкурентности "теплых" ЛУ.

Современное отношение к работам по ускорителям на теплых структурах описывается [4] хлестким словом **a non-started**⁽⁷⁾, со смыслом: *не предполагаемые к*

⁽¹⁾ "CERN Concept of ADS" by Carlo Rubbia, IAEA Technical Committee Meeting. 09/17/1997. 171 p.

⁽²⁾ Исследование критических параметров реакторных систем. 1960. Госатомиздат. С 107.

⁽³⁾ Васильков Р.Г. и др.// АЭ. 1970. Т.29. Вып.3. С.151.

⁽⁴⁾ Р.Г. Васильков, В.И. Гольданский, Б.А. Пименов и др.// АЭ. 1978. Т. 44. Вып. 4. С. 329.

⁽⁵⁾ Барашенков В.С.// ЭЧАЯ.1978. Т8. С.871.

⁽⁶⁾ Сейчас надежды получить большие токи связывают с развитием циклотронов класса FFAG [32].

⁽⁷⁾ **a non-started** – n horse which, although entered for a race, does not run; (fig) person who has no chance of success in sth he undertaken to do. Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English, Special Edition for the USSR, volume II M-Z, AS Hornby, Oxford University Press, Oxford, 1982, p.67.

реализации – «фоновые», относительно которых выигрышно и смотрятся линейные ускорители на сверхпроводящих структурах (SCS), эксплуатируемые при Т~2К.

Фактически во всех проектах последних 20 лет разработчики линейных ускорителей сосредоточили усилия на возможностях SCS. В частности:

- в США (2006 г.) создан самый мощный в мире ЛУ протонов - источник нейтронов – SNS (энергия протонов 1 ГэВ, мощность 1.56 МВт, длина 258 м);
- в США создается (2008-2018 гг.) многофункциональный ЛУ ионов на 8 ГэВ (L=692 м);
- Европейским сообществом (2010-2018 гг.) проектируется нейтронный комплекс ESS на пучке Н линейного ускорителя протонов с энергией 1.33 ГэВ и мощностью пучка 5 МВт;
- Китай, Индия, Япония, Южная Корея реализуют программы, базирующиеся на создании ЛУП для фундаментальных и прикладных исследований, определяющих будущее АЭ.

В этих программах ускорители - «однотехнологичны» - все на сверхпроводимости.

На создание этих ускорителей расходуются многомиллиардные ресурсы.

Конструкции «теплых» ЛУ (для ADS), отличные от традиционных схем, нигде не разрабатываются, не создаются, вообще не принимаются во внимание. Последнее, известное авторам, серьезное обсуждение проблемы было на EPAC-96 [3].

В настоящей работе обсуждаются текущие достижения в разработке ЛУ на высокоэффективных «теплых» ускоряющих структурах, полученные значения общего и электронного КПД и значения величины потерь частиц при их ускорении в УЛОВ'ах.

УСКОРИТЕЛИ НА ОБРАТНОЙ ВОЛНЕ - УЛОВ - И ИХ ВОЗМОЖНОСТИ

Данное предложение авторов вернуться к конструкторской проработке ускорителей на несверхпроводящих структурах (Т=300К) основывается на сопоставлении **качества** (технологичности изготовления), **надежности** работы при длительной (до 50 и более лет) круглосуточной эксплуатации (в т.ч. простоте обслуживания), **общих затрат** на ускорение пучков по технологиям SCS и NS, и **эксплуатационных расходов** ADS.

В работе приведены результаты 40-летних НИОКР [8-27] по определению облика УЛОВ/BWLAP⁽⁹⁾ в диапазоне энергий ускоренных до 10000 МэВ протонов (приведены результаты 9 вариантов, Таблица 1), различающиеся:

- по компоновкам - "линейные, одномерные – 1D", "скрученные с поворотом пучка в плоскости, двумерные - 2D – ABC2D" и "трехмерные – 3D – ABC3D⁽¹⁰⁾";
- по энергетическим и мощностным характеристикам ускоренных в них пучков;
- по частотам ВЧ-питания, темпу ускорения $\Delta W/\Delta z$, числу ускоряющих секций.

⁽⁸⁾ в максимальном режиме Теватрону достаточно всего 1/15 доли ускоренных в таком Линас частиц [4].

⁽⁹⁾ BWLAP- Backward Wave Linear Accelerator of Protons (Particles)

⁽¹⁰⁾ ABC2(3)D – Accelerator Based on the Concept of 2(3) Dimensionality – ускоритель, базирующийся на идеи 2(3)-мерности, т.е. «скрученный» по 2^x- или 3^x-мерным кривым линиям.

Таблица 1

вар	F[MHz]	W[MeV]	impI _b [mA]	impP _b [MW]	impRF[MW]	L[m]	η _e [%]	η _Σ [%]
1	433	0.2–143.3	295.1938	42.24	6x8+4	96	91	39
2	1300	0.34-175.7	303.2447	53.18	8*8+4	48	82	35
3	433	0.2–18.8	306.9249	5.77	2x4	23	86	37
	1300	18.8-60.5		12.8	5x4	18.6	85	34
Σ		60.5		18.5	28	41.6	85	36

4	433	0.2–18.8	306.9249	5.77	2x4	23	86	37
	1300	18.8-134.6		35.54	5x10	29	79	34
Σ		134.6		41.3	58	52.0	82	35
5	433	0.34-175.7	303.1838	53.18	8*8+4	48	82	35
	2600	175.7-1005		251.39	54x8	112.9	69	30
Σ		1004.89		304.56	500	160.9	71	31
6	433	0.2–30.3	306.5917	9.22	2x6	25.7	85	36
	1300	30.3-2020		610.22	31x30	268	73	29
Σ		2020.42		619.44	942	293.7	73.5	29
7	1300	0.35-193.9	307.177	59.56	8x10	46.7	82	35
	3900	193.9-273.6		24.48	3x10+5	8.8	71	31
Σ	3900	273.6-1026		231.3	15x30+15	36.6	58	23
		1026.59		315.3	580.0	92.1	61	25
8	1300	0.35-93.45	310.2032	28.9	4x10	24	82	35
	3900	93.4-633.7		167.6	26x10	74.5	71	31
Σ	3900	633.7-10016		2909.9	172x30	503	60	25
		10016.14		3106.4	5500	577.5	62	26
9	433	0.2–1016	311.77		42x8+4	837	90.7	38
Σ					340			

Вариант 7 теплоъем
Вариант 9 теплоъем

$$\begin{aligned} \{F=40\} \Delta Ph / section < 143 \text{ kW} & \quad \{F=40\} \Delta Ph / \Delta z < 106 \text{ kW/m} \\ \{CW\} \Delta Ph / section < 150 \text{ kW} & \quad \{CW\} \Delta Ph / \Delta z < 35 \text{ kW/m} \end{aligned}$$

Приводятся результаты машинного "синтезирования" двух- (Рис.1, вар.7) и одно-частотного (Рис.2, вар.9) ускорителей на линейных структурах на энергию 1000 МэВ и ток 300 мА. В первом - из-за проблем теплоъема - допустим режим лишь со скважностью 40 ($I_{\text{main}} = 7.5 \text{ мА}$). Во втором - как импульсный, обеспеченный современными ВЧ-приборами со скважностью 8, ($I_{\text{main}} = 37 \text{ мА}$), так и непрерывный (CW) режимы работы.

Предполагается в ВЧ-питании структур использовать клистроны фирмы THALES ED (TH2120, 433 MHz) в одночастотной схеме УЛОВ-CW) и TH2120, TH2104U, 1300 MHz, отечественные клистроны на 2600 МГц и «гипотетические» клистроны-3900 MHz в импульсных (со скважностью 8-40) двух- и трехчастотных вариантах.

Линейный ускоритель протонов – УЛОВ-1026 МэВ

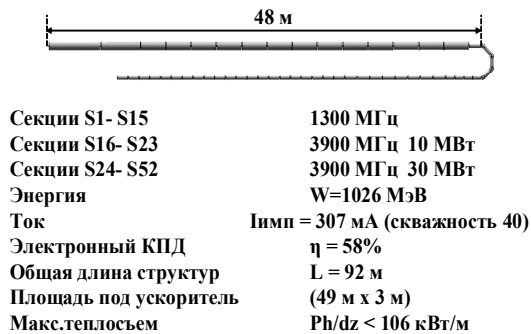


Рис.1. Компоновка двухчастотного (1300-3900 MHz) УЛОВ-1.0 ГэВ

УЛОВ-1016 МэВ
(импульсный или CW режим при 300К)

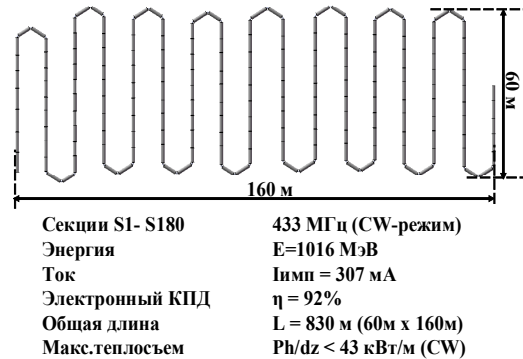


Рис.2. Компоновка одночастотного (433 MHz) УЛОВ-CW-1.0 ГэВ

С целью максимального использования установленной ВЧ-мощности [19,20] в схеме подачи ВЧ-мощности применены "активные и виртуальные" клистроны. В УЛОВ каждая вторая ("чётная") секция запитывается через 3-дБ-ный сумматор, на оба входа которого подается по 0.5-доли от величины ВЧ-мощности, поступающей в предыдущие две секции ускорителя (в "нечётную" от клистрона Р мощности, а в «чётную» от аналогичного сумматора). При такой схеме подачи ВЧ-мощности в каждой ускоряющей секции расходуется лишь 0.5 ВЧ-мощности, подаваемой в секцию, а "неиспользованные" 0.5Р подается на один из входов ВЧ-сумматора, который, при подачи такой же «половинки» ВЧ-мощности с другой секции, становится "виртуальным клистроном" - источником ВЧ-мощности "чётных" секций (Рис.3).

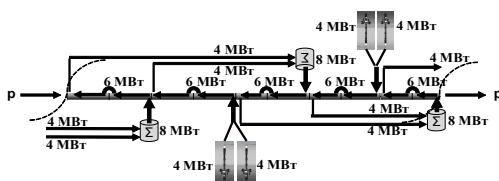


Рис.3. Схема ВЧ-питания секций ускорителей

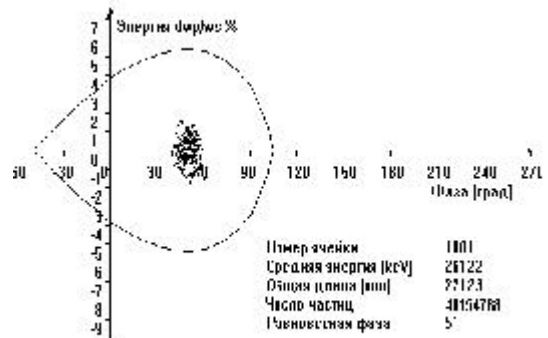


Рис.4. Расположение сгустка в сепаратрисе на бегущей (обратной) волне.

Захват частиц и формирование протонов в четко очерченный сгусток завершается в первой секции (при $W < 4$ МэВ и $\eta_{сарт} > 90\%$). Сформированный в нарастающих $E_z(z)$ -полях сгусток (вместе со своей "шубой") находится в центре сепаратрисы, обеспечивая полное отсутствие потерь частиц при дальнейшем ускорении (Рис.4).

Применение для фокусировки в УЛОВ продольного аксиально-симметрического магнитного поля B_z позволило решить проблему потерь частиц в ускоряющих структурах (постановка и значимость – [30,31]; решение – [24-26]).

Подчеркнем: с точностью до 1/44млн-доли от величины ускоряемого тока (чувствительность к потерям, соответствует потери 120 протонов) – **потери ускоренных**

протонов отсутствуют во всех секциях (исключение – первая секция) и во всех узлах поворота пучка [18,24-26]. Диаметр пучка, при этом, не превышает 3 мм (Рис.5).

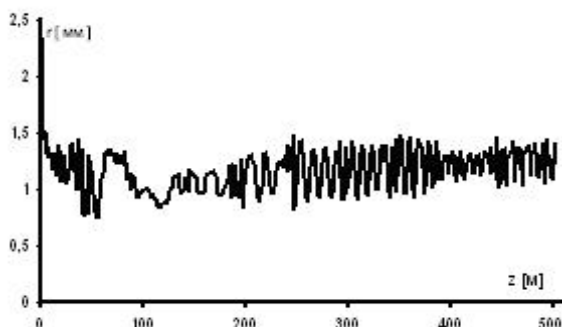


Рис.5. Результат расчета радиуса пучка в УЛОВ-CW-1ГэВ.

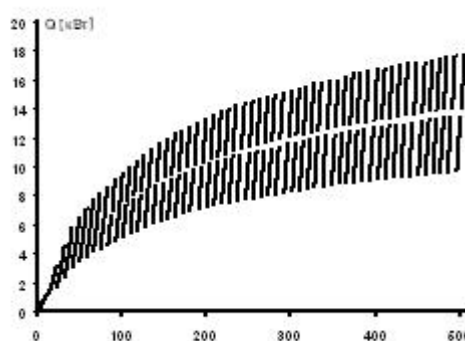


Рис.6. Результат расчета ВЧ-тепловыделения в УЛОВ-CW-1ГэВ.

При разработке ускорителя для подкритического реактора (УЛОВ-CW-режима) большое внимание было уделено проблеме ВЧ-тепловыделения (Рис.6) в структурах и изучению возможности снятия тепла потоком воды [20,23,26,27]. Принятое 433-МГц-питание и технологические ограничения на длину ускоряющих структур привело к схеме последовательной запитки каждой из пары структур. Одной, длиной ~ 3.8 м, в которой тратится 2 МВт ВЧ-мощности и соединенной непосредственно с источником 8 МВт, и второй, длиной ~4.5 м, в которой расходует также 2 МВт из 6 МВт, поступающей в эту структуру из предыдущей. Оставшиеся 4 МВт направляют на вход ВЧ-сумматора.

Основные параметры УЛОВ-CW-1ГэВ отражены в Табл.2.

Основные параметры УЛОВ-CW-1ГэВ

Таблица 2

180 Sections, $W=1016.015$ MeV, $I_{main}=306.9249$ mA, $L=837.5$ m, 48 turns

вариант f MHz	энергия, MeV	мощность ΔP_{beam} MW	ВЧпитание (установ) MW	длина m	$\eta_e=P_b/P_{RF}$ %	$\eta_\Sigma=P_b/P_{wall}$ %
433	0.2–1016	311	46*8+4=372	837.5	91.8	39

Основные параметры УЛОВ-1.0 ГэВ

Таблица 3

52 Sections, 1026.59 MeV, $I_{imp}=307.177$ mA, $I_{main}=7.5$ mA, $L=92.1$ m, 4 turns

вариант f MHz	энергия, MeV	мощность ΔP_{beam} MW	ВЧпитание (установ) MW	длина m	$\eta_e=P_b/P_{RF}$ %	$\eta_\Sigma=P_b/P_{wall}$ %
1300	0.35-193.9	59.56	4*8	46.7	82	35
3900	193.9-273.6	24.48	3x10	8.8	71	31
3900	273.6-1026	231.3	15x10+15	36.6	58	23
Σ	1026.59	315.3	580	92.1	61	25

Проведенные НИОКР показали возможность создания ускорителя непрерывного режима - ускорителя УЛОВ-CW - на энергию протонов 1000 МэВ с мощностью в пучке до 300 МВт, при этом все ускоряющие структуры (180 структур) охлаждаются водой. При существующих ВЧ-приборах – реально получить пучок протонов 36-МВт-ной мощности.

УЛОВ-1.0 ГэВ – ускоритель протонов на 1 ГэВ наиболее компактен: его можно разместить на площади 50 м x 8 м. Активная длина ускоряющих структур – 85 м (Табл.3 и Рис.1).

Общий КПД ускоряющих комплексов на энергию 1000 МэВ, равный отношению приращения мощности пучка $\Delta P_{\text{пучка}}$ к полным затратам электроэнергии (к мощности «от розетки» $\Delta P_{\text{АС}}$) на получение этой $\Delta P_{\text{пучка}}$ может достигнуть $\eta_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пучка}} / \Delta P_{\text{АС}} \sim 40\%$ в УЛОВ-CW. А КПД комплекса с УЛОВ-1.0 ГэВ (7.5 МВт) составит $\eta_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пучка}} / \Delta P_{\text{АС}} > 25\%$. Такой УЛОВ, при равной энергии протонов, что у самого мощного на сегодня ускорителя SNS, будет иметь в 3.5 раз меньшую длину и в 5 раз большую мощность пучка.

Электронный КПД – отношение мощности ускоренного пучка к ВЧ-затратам – $\eta_e = P_b / P_{\text{RF}} \sim I_{\text{imp}} / (I_{\text{imp}} + E / Z_{\text{sh}})$. Отсюда очевидны причины борьбы разработчиков ускорителей за увеличение Z_{sh} – важнейшей характеристики ускоряющих структур – и за рост I_{imp} . Становится очевидной "плата" за высокий темп ускорения (за E) – с ростом темпа КПД η_e снижается.

На Рис.7. показана эффективность различных ускоряющих структур – их шунтовые сопротивления – $Z_{\text{sh}}(E)$ [МОhm/m] в зависимости от энергии ускоряемых протонов [28,29]

- Результат на структуре 3900 МГц, 2009 г. [21].

★ Из материалов "Предварительная оценка новейших структур высокочастотных линейных ускорителей, разработанных в бывшем Советском Союзе", подготовленных по заданию Командования космической и стратегической обороны Армии США, 7 февраля 1994г., [28]).

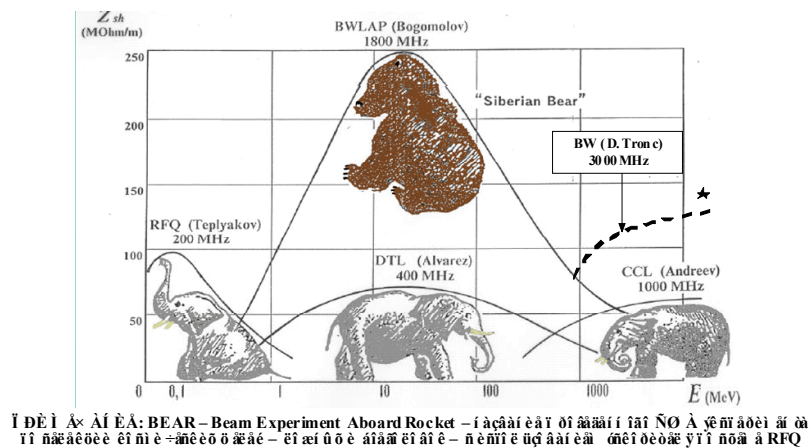


Рис.7. "Эффективность" – шунтовое сопротивление - различных ускоряющих структур.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ Linac 8 GeV и 1 GeV SNS VERSA ВОДООХЛАЖДАЕМЫЕ УЛОВ (BWLAP)

Проведем краткую сравнительную оценку наиболее мощных ускорителей на SCS и на NCS-структурах для "систем круглогодичной эксплуатации": с подкритическими реакторами, в трансмутаторах-пережигателях РАО и МА, нейтронных генераторах и т.п.

В Таблице 4 приведены важнейшие характеристики введенного в эксплуатацию в 2006г. сверхпроводящего ускорителя (комплекс SNS, Oak Ridge, USA) и создаваемого к 2018г. 8-ГэВ-ного СП-инжектора Теватрона (FermiLab, Batavia, USA) с вариантами достижения аналогичных параметров, в случае реализации УЛОВ'ов с T~300K ускоряющих структур и снятия с них ВЧ-тепла (и термостатирования) потоком воды.

Таблица 4

	8 GeV Injector	SNS -Spallation Neutron Source	BWLAP/ ABC2D	BWLAP/ ABC3D
Энергия ускорителя	8 GeV	1 GeV	1 GeV	10 GeV
Тип частиц	H ⁺ , or e ⁺	H ⁻	p ⁺	p ⁺
Мощность пучка	2 MW	1.56 MW	3/36 MW	3/72/360MW
Мощность от сети	12 MW	~15 MW	8/114 MW	9/235/1100 MW
Длительность имп. пучка	1 msec	1 msec	1/10 msec	1/10 msec
Импульсный ток	26 mA	26 mA	305 mA	310 mA
Частота следования импул.	0.6 – 10 Hz	60 Hz	12.5 Hz	0.1/2.5/12.5 Hz
Число сверхпровод. ячеек	384	81	-	-
Число крио-модулей	48	23	92SCS	411SCS
Количество клистронов	41	93	71300+753900	41300+2063900
Число ячеек на клистрон	8 – 12	1	2section/1klystron	2section/1klystron
Мах поверхностное E-поле	45 MV/m	35 MV/m	32MV/m	48 MV/m
Мах ускоряющий градиент	22.5 MV/m	16 MV/m	61300+183900	323900 MV/m
Длина ускорителя (чистая)	692 m	258 m	120 m	578 m (60x15x8)

(самое главное – **противопоставляемое** – выделено **bold**)

Позиция авторов основывается на экспериментальных результатах исследования сотен макетов ускоряющих структур, выполненных в двух частотных диапазонах - 1820 и 910 МГц, являющихся БЗ, используемой при «синтезировании» УЛОВ'ов и при сравнении с выдающимися проектами ускорителей на линейных сверхпроводящих структурах.

Подчеркнем, что ускорители на SC имеют в своем составе криогенный «завод» с длиной, сопоставимой с ускорителем. «Завод» обеспечивает поддержание необходимой температуры структур - 2К (при этом для снятия со структуры 1 Ватта мощности ВЧ-потерь затрачивается как минимум 1.2 кВт электроэнергии) [33].

Общие затраты электроэнергии (total wall power - P_{AC}) на ускорение 2 МВт-ного протонного пучка в 8-ГэВ-ном сверхпроводящем линейном ускорителе с 26 мА импульсным током и 1 миллисекундной длительностью импульса тока (длительность ВЧ-импульса 1.2 мсек) рассчитываются по соотношению:

$$P_{AC} = (2 \text{ MW standby}) + (1\text{MW/Hz} * 10\text{Hz}) = 12 \text{ MW}$$

И если бы разговор зашел о пучке с мощностью 36 МВт, то частота следования импульсов той же длительности, составила бы 180 Hz. При этом P_{AC} возрастет до > 180 МВт (при условии неучета увеличения мощности в низкоэнергетической RFQ+6DTL резонаторов

несверхпроводящей части 8-ГэВ-ного ускорителя). Более реалистично смотрится оценка суммарных затрат существенно более 240 МВт.

Подчеркнем: *большое место* комплексов с ускорителями на сверхпроводимости – поломки в криогенных контурах ускорителя и на криогенном заводе.

Эксплуатация сверхпроводящих ускорительных комплексов требует значительного количества обслуживающего персонала и сравнительно больших ресурсов на эксплуатацию, а также времени на проведение регламентных работ и на устранение неисправностей.

Финансовые затраты как на изготовление и эксплуатацию сверхпроводящих ускоряющих структур (ускорителей), так и на эксплуатацию собственно криогенного завода составляют *существенно более половины всех затрат* в таких ускорительных комплексах.

А в NS-структурах теплосъем осуществляют проточной водой.

Авторы убеждены, что утверждение о *низком кпд "теплых" ЛУ* в сравнении с ЛУ на SCS базируется на характеристиках ЛУ предыдущего периода их исследования и относятся только к *электронному кпд*.

Достигнутый в УЛОВ-СВ кпд преобразования энергии ВЧ-поля в кинетическую энергию ускоряемого пучка $\eta_e = \Delta P_B / \Delta P_{RF} \sim 90\%$ на структурах комнатной температуры требует развертывания целевых работ в РФ по УСКОРИТЕЛЕСТРОЕНИЮ – в первую очередь для уничтожения РАО и МА и создания АЭС на подкритических реакторах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты НИОКР позволяют сделать следующее заключение.

Отличия УЛОВ'ов и выявленные инновации позволяют рекомендовать «теплые» линейные ускорители на обратной волне в качестве серьезных конкурентов ускорителям на сверхпроводящих структурах для программ ADS.

Ускорительные комплексы, если они будут выполняться по схеме ускорителя на обратной волне с системой теплосъема водой комнатной температуры, обеспечат мощность в ускоренном протонном пучке ~ 2-3 (30) МВт и энергию протонов 1-10 ГэВ и будут обладать огромным превосходством по сравнению с ускорителями на сверхпроводящих структурах всилу:

1. Многократного преимущества по общему кпд.
 2. Преимущества по темпу ускорения частиц (УЛОВ-1ГэВ, 7МВт, длина 92м).
 3. Компоновки УЛОВ, обеспечивающей сейсмоустойчивость комплекса в целом и позволяющей избежать "переусложненности ускорителя" из-за необходимости учета в конструкции ускорителя кривизны Земли [4] и магнитного поля Земли (УЛОВ-10 ГэВ, 10 МВт, на площади 60м*15м).
 4. Существенно большей надежности и ремонтпригодности.
 5. Существенно меньшей (в три-пять раз) стоимости создания комплекса.
 6. Существенно меньшей активации и ускорителя, и всего комплекса ADS.
 7. Существенно меньших (в разы) эксплуатационных затрат.
 8. Потенциала УЛОВ-1ГэВ – возможности наращивания мощность пучка до 300 МВт
- Результаты по общему кпд в УЛОВ'ах получены всилу:
- Присущего методу ускорения на обратной волне – росту $E_z(z)$, что и открыло возможность ускорять нерелятивистские ионы на бегущей (обратной) волне.
 - Достигнутого значения величины ускоряемого импульсного тока (300 мА).
 - Разработки новой системы ВЧ-питания ускоряющих структур в режиме бегущей волны, обеспечивающей полное использование установленной ВЧ-мощности.
 - Применения внешней (по отношению к ускоряющим структурам) фокусирующей системы из сверхпроводящих соленоидов.

- Преимущества разработанных и примененных ускоряющих структур с магнитной связью между ячейками (структур с аномальной дисперсией) – из-за присущего им высокого (более 100 МОм/м) значения шунтового сопротивления. (Рассмотри Рис.7).

В России предложения по реализации классической схемы ADS на NS обсуждались на различных форумах. В частности, вопрос применения «теплого» линейного ускорителя УЛОВ (BWLAP) с каскадным, подкритическим жидкосолевым реактором рассмотрен в совместной публикации разработчиков реакторов и ускорительщиков: "Перспективы развития ядерной энергетики и управления ею на базе технологий нового поколения" [34].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны всему коллективу Отдела ускорительной техники и руководству Института химической кинетики и горения Сибирского отделения Академии наук и руководству СО АН за многолетнюю помощь и участие в становлении работ по новому направлению в теории и практике применения линейных ускорителей - оригинального метода ускорения ионов на обратной волне. Один из авторов (АСБ) искренне признателен коллективу 14 кафедры МИФИ, привившему ему любовь к ускорительной технике (с 1962г.) и за постоянное сотрудничество в разрешении многочисленных вопросов на протяжении уже полувека. Авторы особо признательны Генеральному конструктору ЦНИИ "Комета" академику А.И. Савину за постоянную поддержку – в науке, реализации задуманного и в вопросах финансирования работ.

Литература

- [1] Ж.-П. Риволь.// УФН. 2003. Т.173, №7. С. 747.
- [2] M. Promè.// Proc. 1994 Int. Linac Conf. V. 1. P. 146.
- [3] R.A. Jameson.// Proc. EPAC-96. P. 210.
- [4] Ed. G.W. Foster, W. Chou, and E. Malamud.// An 8 GeV Superconducting Injector Linac Design Study, The Proton Driver Study II, SCRF Linac Option. *FNAL-TM-2169 (Part II)*. 2003.
- [5] N. Holtkamp.// Proc. of 22-d Intern. Linear Acc. Conf.-2004. 2004. P. 837.
- [6] ESS Accelerator and Spallation Target Technologies for ADS Applications. A Status Report. Nuclear Energy Agency #5421. OECD. France 2005. ISBN 92-64-01056-4.
- [7] Generation IV Nuclear Energy Systems Ten-Year Program Plan. Fiscal Year 2005. US DOE ONEST. March 2003; and A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Executive Summary. US DOE NERAC. GIF-001-00. March 2003.
- [8] А.С. Богомолов.// Способ ускорения тяжелых заряженных частиц. Авт. свид. СССР №269369. 18.02.69.
- [9] А.С. Богомолов.// Линейный ускоритель протонов. Авт. свид. СССР №392608. 18.02.69.
- [10] A.S. Bogomolov.// Method for linear acceleration of heavy charged particles and device for its realization. US-PS #3651417. 21.03.1972 и аналогичные патенты Франции, ФРГ, Канады: RF-PS #2035479. 18.12.70; DT-PS #2007019. 22.04.71; Can-PS #902777. 05.10.71.
- [11] А.С. Богомолов.// ДАН. 1973. Т. 208. №.6. С. 1328.
- [12] А.С. Богомолов, Бакиров Т.С., Иванников В.И., В.В. Перов.// Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22. Вып. 9. С. 465.
- [13] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров, В.И. Иванников, В.В. Перов.// Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 1. С. 42.
- [14] A.S. Bogomolov.// Proc. 1994 Int. Linac Conf. 1994. V.2. P. 789.
- [15] А.С. Богомолов.// Сборник научных трудов (МИФИ). 1998. - Т. 7. С. 159.

- [16] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// Способ и устройство получения ускоренных заряженных частиц. Патент РФ №2152142. 13.10.1999. Бюл. № 18. 2000.
- [17] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// Сборник научных трудов (МИФИ). 2003. Т. 7. С. 139.
- [18] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// Ускоритель протонов на энергию 10 ГэВ с импульсным током 300 мА (результаты компьютерного моделирования ускорителя BWLAP/ABC2D для релятивистской тяжелоядерной (ЯРТ) энергетики, вариант 36000 частиц. М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2007. 40 с.
- [19] А.С. Богомолов.// Устройство для ускорения заряженных частиц. Патент РФ №2236094 24.12.2002. Бюл. № 25. 2004.
- [20] А.С. Богомолов.// О новом распределении потока ВЧ-мощности в ускоряющих структурах и схеме подачи ВЧ-мощности в них. О максимальном использовании установленной мощности ВЧ-источников и повышении среднего темпа в структурах. Двухчастотный 1300/2600 МГц ускоритель протонов с $\Delta W/\Delta z \sim 10$ MeV/m BWLAP-600 MeV/300mA. Инв. №1705. М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД", 2003. 26 с.
- [21] А.С. Богомолов, Р.О. Болгов, М.В. Лалаян. Н.П. Собенин.// Сборник научных трудов (МИФИ). 2010. Т. 1. С. 164.
- [22] А.С. Богомолов.// К проблеме выбора допустимого темпа ускорения и требуемого ВЧ-обеспечения высокочастотной части ускорителя протонов на обратной волне (2600 MHz, CW-BWLAP) с точки зрения допустимых тепловых потерь в ускоряющих структурах (при $T \sim 300$ К). М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2003. 20 с.
- [23] А.С. Богомолов, Ю.М. Еськов.// Сборник научных трудов (МИФИ). 2010. Т. 1. С. 167.
- [24] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// Отчет-1.2 ГэВ: 13-секционный 433-МГц ускоритель протонов на энергию 143 МэВ с 28 секциями на 1300 МГц до энергии 503 МэВ и 60 секциями на 2600 МГц до энергии 1222 МэВ с импульсным током 300 мА и средним током 37 мА (расчет характеристик с массивом 44000000 частиц, $V < 7.5$ T). М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2010. 29 с.
- [25] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// 13-секционный 433-МГц ускоритель протонов на энергию 143 МэВ с импульсным током 295 мА и средним током 36 мА и электронным КПД 90% (расчет характеристик с массивом 44000000 частиц, $V < 8.0$ T). М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2010. 16 с.
- [26] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// УЛОВ-CW-1000МэВ-300мА - 180-секционный 433-МГц ускоритель протонов на энергию 1016 МэВ с током 306 мА и мощностью в пучке 310 МВт (расчет характеристик с массивом 44000000 частиц, $V < 8$ T) М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2011. 40 с.
- [27] А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров.// УЛОВ-1.0 ГэВ с импульсным током 300мА (результат компьютерного моделирования ускорителя BWLAP/ABC2D-ADS, вариант 36000 частиц), М. Отчет ЗАО "ФИЗТЕХМЕД". 2007. 12 с.
- [28] Todd A.M.M., Bauer T., Gillespie G.H. etc.// Preliminary Assessment of Novel RF Linear Accelerator Structures in The Former Soviet Union, prepared for: United States Army Space and Strategic Defense Command. NPBSE-94. Feb. 7 1994. P. 68 + 3 Appendixes.
- [29] Dominique Tronc.// Proton Accelerator using A Traveling Wave with Magnetic Coupling. US Patent # 5,412,283. May 2. 1995.
- [30] Б.П. Мурин, А.П. Федотов.// Атомная энергия. 1975. Т.38. Вып.3. С. 146.
- [31] Под ред. Б.П. Мурина. Линейные ускорители ионов. Т. 1 Проблемы и теория. М. Атомиздат. 1978.
- [32] А.А. Васильев, И.И. Есаков.// Разработка FFAG ускорителей для трансмутации отходов АЭС и выработки энергии. Препринт 2010-01. М. ФГУП "МРТИ РАН". 2010. 16 с.
- [33] Sang-ho, Isidoro E. Campisi.// Phys. Rev. ST A&B. 2007. **10**. 032001 (11). P. 032001-1.

[34] Г.И. Марчук, Н.Н. Пономарев-Степной, А.И. Савин, и др.// Радиотехника и Управление. 2002. № 4-6. С. 46.

Поступила: 02.03.11.