

B-225



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ**

9-8117

**ВАХРУШИН**  
**Юрий Петрович**

**ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ**

**Специальность О5.14.11 - электрофизические  
установки и ускорители**

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

9-8117

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры имени Д.В.Ефремова.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор физико-математических наук

И.М.Капчинский,

профессор, доктор физико-математических наук

А.А.Глазков,

доктор технических наук

С.К.Есин

Ведущее учреждение: Радиотехнический институт АН СССР.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1974 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1974 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь совета  
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов

**ВАХРУШИН**  
Юрий Петрович

## ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Специальность 05.14.11 - электрофизические  
установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## В в е д е н и е

В статье, посвященной будущему науки [ 1 ], академик М.А.Марков, подводя итоги развития микрофизики, отмечал, что, наряду с непрерывным развитием физики высоких энергий, развивается физика пучков относительно низких энергий, но высоких интенсивностей. Причем: "В отличие от физики высоких энергий, лазерные лучи, сильноточные электронные, протонные ускорители - мезонные фабрики - имеют почти беспредельные возможности практических применений в технике, в медицине, в народном хозяйстве".

Одним из направлений в технике получения интенсивных электронных пучков в мегаэлектрон-вольтном диапазоне энергий является создание сильноточных линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). Первые ускорители этого типа были запущены в середине шестидесятых годов в США и СССР в связи с исследованиями в области управляемого термоядерного синтеза и коллективного метода ускорения<sup>/3/</sup>. Эксплуатация первых ускорителей показала, что весьма простой метод ускорения, примененный в них, позволяющий при коэффициенте полезного действия в десятки процентов получать релятивистские пучки электронов в сотни и тысячи ампер, является перспективным. В этой связи в последующие годы как в СССР, так и за рубежом, проводятся работы по сооружению ускорителей этого типа<sup>/3/</sup>. Одновременно разрабатывается их теория, ведутся экспериментальные исследования, совершенствуется конструкция. В результате сформировалась новая область ускорительной техники [2,3]. Принцип действия ЛИУ относительно прост и заключается в том, что при изменении магнитного потока в тороидальном сердечнике в соответствии с принципом электромагнитной индукции возникает электрическое поле, которое может быть использовано для ускорения заряженных частиц, рис.1. Последовательный ряд из таких тороидальных элементов (индукторов) образует так называемую индукционную систему, при достаточно большой протяженности

которой поле на оси  $E_0$  определяется выражением

$$E_0 = -(N/L)F \partial B / \partial t \quad (1)$$

или

$$E_0 = -Nu_1/L, \quad (2)$$

где  $N$  - число сердечников,  $F$  - сечение одного сердечника,  $B$  - среднее по сечению значение индукции в сердечнике,  $u_1$  - прикладываемое к первичной обмотке напряжение,  $L$  - длина системы,  $\partial B / \partial t$  - скорость изменения индукции в сердечнике.

Легко видеть, что увеличение энергии пучка достигается простым наращиванием числа индукторов, а ускоряющее поле распределено вдоль системы подобно тому, как это имеет место в резонансных волноводных ускорителях. Это выгодно отличает ускорители типа ЛИУ от других трансформаторных ускорителей. Хотя принцип действия ЛИУ относительно и прост, разработка и создание ускорителей, удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям, потребовало решения комплекса вопросов теоретического, экспериментального и технологического характера. Работы, выполненные в этой связи в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова лично автором или под его руководством, легли в основу настоящей диссертации.

#### Глава I. Импульсное перемангничивание сердечников индукционной системы.

В первом приближении индукционную систему можно представить в виде последовательного ряда одновитковых импульсных трансформаторов. Однако уже в процессе разработки первых ускорителей было выявлено, что применение теории импульсных трансформаторов к расчету индукционной системы дает неудовлетворительные результаты. Анализ показал, что в наносекундном диапазоне длительностей импульса, характерном для ЛИУ, и при использовании ленты из магнитомягких сплавов с ППГ толщиной (10+20) мкм, что обусловлено стремлением иметь достаточно высокий

к.п.д., при изменении магнитного потока проявляется действие не только вихревых токов, но и магнитной вязкости, а индуктивная составляющая тока относительно мала. Последнее справедливо и при использовании магнитомягких ферритов. В этой связи предложено для расчета индукционной системы использовать теорию импульсного перемангничивания, развитую для материалов с ППГ в связи с использованием их для магнитных элементов вычислительной техники. В этом случае перемангничивание сердечника из ферромагнетика с ППГ с учетом вихревых токов и магнитной вязкости описывается уравнением

$$H(t) = H_0 + g(B) dB/dt, \quad (3)$$

где  $H(t)$  - магнитное поле на поверхности ферромагнетика,

$H_0$  - постоянная величина, значение которой зависит, главным образом, от марки материала и, в меньшей степени, от толщины ленты сплава и формы импульса тока;

$$g(B) = (\delta^2/8B_z)(B(t) + B_z) + [\zeta_m(1 - B^2(t)/B_s^2)]^{-1}, \quad (4)$$

где  $B_z$ ,  $B_s$  - остаточная индукция и индукция насыщения,

$\delta$  - толщина ленты, намотанной на сердечник,

$\sigma$  - электропроводность ферромагнетика,

$\zeta_m$  - постоянная, зависящая от марки материала и имеющая размерность Ом/м. Первый член в правой части (4) характеризует действие вихревых токов, для ферритов он равен нулю. Второй член обусловлен магнитной вязкостью и имеет место как для ферритов, так и для металлических ферромагнетиков.

Принтегрировав (3) по времени, получаем

$$\int_0^t [H(t) - H_0] dt = \int_{B_{нач}}^{B(t)} g(B) dB. \quad (5)$$

Интеграл в левой части равенства называется импульсом поля, и при полном перемагничивании его значение не зависит от длительности и формы перемагничивающего тока. Импульс поля при полном перемагничивании называется коэффициентом переключения и представляет собой количество электричества, отнесенное к единице длины сердечника и необходимое для его полного перемагничивания. Интегрирование (5) приводит к выражению для импульса поля

$$Q_g(t) = \frac{\sigma \delta^2}{16 B_z} [B(t) + B_z]^2 + \frac{B_s}{2m} [\operatorname{arctg}(B_z/B_s) + \operatorname{arctg}(B(t)/B_s)] \quad (6)$$

Проведенный анализ перемагничивания показывает, что изменение индукции должно иметь место в интервале  $-B_z \leq B \leq B_z$ , и выражение (6) можно привести к более простому виду

$$Q_g(t) = (B_z \sigma \delta^2 / 4) \lambda^2 + (2 B_s / 2m) \operatorname{arctg}(B_z / B_s) \cdot \lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda = \Delta B / 2 B_s$ , причем предполагается, что

$$\frac{B(t) + B_z}{2 B_z} \approx \frac{B(t) + B_z}{2 B_s}$$

При  $\lambda = 1$  из (6) следует

$$S_w = S_{we} + S_{wo}, \quad (8)$$

где  $S_{we}$  - составляющая коэффициента переключения, обусловленная действием вихревых токов, а  $S_{wo}$  - обусловленная действием магнитной вязкости.

При  $\lambda < 1$

$$Q_g(\lambda) = S_{we} \lambda^2 + S_{wo} \lambda. \quad (9)$$

Основные выводы теории подтверждены экспериментальными результатами, полученными при исследовании сердечников, изготовленных из лент

ты магнитомягких сплавов толщиной 10; 20 мкм с применением заводской технологии [4,5,6]. Исследованию были подвергнуты сердечники из трех групп сплавов. Первая группа - это сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД, которые имеют индукцию насыщения  $B_s < 1$  Т, а коэрцитивную силу

$$H_c < 6 \text{ А/м};$$

вторая группа - сплавы 50НП, 65НП, Э4НМП, 50НХС, которые имеют индукцию насыщения  $B_s = (1,0 \div 1,5)$  Т и коэрцитивную силу  $H_c = (6 \div 20)$  А/м; третья группа - сплавы на железокобальтовой основе, обладающие высокой индукцией насыщения  $B_s \approx 2,4$  Т и

прямоугольной петлей гистерезиса после специального отжига в магнитном поле. Исследование проводилось с помощью специально разработанного и изготовленного высоковольтного генератора прямоугольных импульсов с длительностью 150, 250, 500 нсек<sup>5,6</sup>. Проведенный анализ экспериментальных характеристик и теоретических выражений в сочетании с данными о стоимости ленты и особенностях технологии отжига показал, что из рассмотренных материалов в ЛИУ целесообразно использовать 79НМ в слабых полях, 50НП в средних и 49КФ2 в сильных, в случае, когда требуется уменьшить габариты установки. Получено удовлетворительное согласие теории с экспериментом для сердечников из всех исследованных сплавов. Поскольку расчет характеристик на частном цикле перемагничивания затруднителен, получены семейства характеристик на частных циклах перемагничивания, облегчающие оптимизацию ускорителя по требуемому параметру. Полученные экспериментальные характеристики дали возможность определить удельные потери энергии при перемагничивании, величина которых хорошо согласуется с теоретическими, вычисленными из уравнения

$$W_M = 2 B_s H_0 \lambda + \frac{2 B_s}{T} (S_{wo} \lambda^2 + S_{we} \lambda^3). \quad (10)$$

Здесь  $W_M$  - удельные потери, а  $H_0 = H_c + H_p$ , где  $H_p$  - размагничивающее поле. Второй член в правой части характеризует динамические потери, обусловленные магнитной вязкостью и вихревыми токами.

Наряду со сплавами подверглись исследованию магнитомягкие марганец-цинковые и никельцинковые ферриты [6,7]. Исследования проводились на том же генераторе при длительности импульса прямоугольного напряжения 150, 250, 500 нсек. В отличие от сплавов с ШГ, у ферритов приращение индукции при перемагничивании существенно зависит от величины размагничивающего поля. Поэтому исследования выполнены при ряде значений размагничивающего поля. Анализ полученных характеристик показывает, что у никельцинковых ферритов увеличение размагничивающего поля на порядок приводит к значительному увеличению приращения индукции (до 50%), а у марганеццинковых ферритов приращение увеличивается на 15-20%. Поведение марганеццинковых ферритов при импульсном перемагничивании аналогично сплавам с ШГ. В импульсном магнитном поле до 400 А/м у марганеццинковых ферритов приращение индукции достигает 0,5-0,7 Т, а у никельцинковых 0,1-0,4 Т.

На основании теоретических и экспериментальных данных определен к.п.д. индукционной системы в зависимости от длительности импульса, марки ферромагнетика и тока ускоряемого пучка, и даны рекомендации по выбору ферромагнетика в зависимости от требований, предъявляемых к ускорителю [7]. При токах пучка, меньших 1000 А, к.п.д. сохраняет достаточно высокое значение, если  $\tau > 100$  нсек. При токах же пучка, больших 1000 А, он имеет высокие значения во всем диапазоне длительностей импульсов, характерном для ЛИУ.

Свойства ферромагнетиков в зависимости от длительности импульса характеризуются также величиной кажущейся магнитной проницаемости

$$\mu_{\text{к}} = \mu_2 \frac{\Delta B}{\mu_0 H}, \quad (\text{II})$$

где  $\mu_2$  - коэффициент заполнения сердечника; для ферритов  $\mu_2 = 1$ , для сплавов - 0,7.

Проведенное изучение магнитомягких ферромагнетиков показало, что при изменении магнитного потока в ферромагнитных сердечниках индукционной системы ЛИУ величина перемагничивающего поля обусловлена, главным образом, действием вихревых токов и магнитной вязкости, а индуктивной составляющей можно пренебречь. Вследствие этого, при рассмотрении эквивалентной схемы индукционной системы следует отказаться от обычной схемы импульсного трансформатора и заменить ферромагнитный сердечник эквивалентным нелинейным сопротивлением. Кроме сопротивления, в схему индукционной системы входит динамическая емкость между обмотками, индуктивность рассеяния и генератор тока  $i_n(t)$ , характеризующий ток пучка ускоряемых частиц.

Другой частью ускоряющей системы является импульсная система, в емкости формирующего двухполюсника которой накапливается энергия в паузах между рабочими импульсами и передается к индукционной системе во время рабочего импульса с помощью коммутатора, представленного на схеме ключом и индуктивностью, величина которой меняется во времени. Преобразование формы импульса ускоряющего напряжения может осуществляться с помощью специального устройства. В общем случае расчет ускоряющей системы, включающей в себя линейные и нелинейные элементы, заключается в том, чтобы по заданному ускоряющему напряжению  $u(t)$ , току пучка и зарядному напряжению  $u_z$  определить характеристики всех элементов. В диссертации приводятся результаты теоретических и экспериментальных работ по определению характеристик элементов, применение которых возможно в ускоряющей системе по уровню рабочего напряжения, мощности и другим параметрам в условиях работы, характерных для ЛИУ. Полученные данные дают возможность, не решая задачу синтеза в полном объеме, составить схему ускоряющей системы в первом приближении и "довести" ее затем до требуемых параметров экспериментально,

на макете. Получены выражения, дающие возможность определить индуктивность рассеяния и динамическую емкость между обмотками в зависимости от варианта конструкции индукционной системы, и, на основе анализа выражений, сформулированы рекомендации по выбору вариантов индукционной системы для заданных параметров импульса тока ускоряемого пучка<sup>18/</sup>. Показано, в частности, что наименьшие значения составляющих фронта импульса ускоряющего напряжения, обусловленных наличием динамической емкости и индуктивности рассеяния в собственно индукционной системе и ускорительной трубке, имеют место, если вариант конструкции соответствует величине эквивалентного сопротивления индуктора, определяемого на фронте импульса. Разрабатываемые в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова ЛИУ предназначены для работы при частотах повторения в десятки имп/сек<sup>22, 24, 27/</sup>. Требованиям коммутировать энергию с такой частотой повторения могут удовлетворять импульсные водородные тиратроны. Однако серийные приборы разработаны для микросекундного диапазона, и использование их в наносекундном диапазоне в условиях, когда время коммутации тиратрона соизмеримо с длительностью импульса, а среднее значение коммутируемого тока меньше допустимого, потребовало экспериментального исследования, результаты которого приведены в диссертации. Далее, в результате анализа экспериментальных данных показано, что при длительности импульса  $\tau > 100$  нсек могут быть получены импульсы напряжения требуемой формы при использовании импульсного водородного тиратрона и неоднородной формирующей линии, в которой используются бумагопленочные конденсаторы. При длительности импульса  $\tau < 100$  нсек целесообразно применять разряд емкости и преобразование получаемого при этом импульса с помощью специального преобразователя. В качестве последнего может быть использовано устройство, представляющее собой коаксиальную линию, нагруженную ферромагнитными сердечниками из материала с ШГ и включенную последовательно с индукционной системой. Комбинация двух последовательных ферромагнитных систем имеет S-образную характеристику преобразова-

ния, при которой колоколообразный импульс преобразуется в прямоугольный меньшей длительности. Исследования показали, что в такой системе достигается изменение формы импульса ускоряющего напряжения путем изменения соотношения диаметров сердечников индукционной системы и преобразователя, и величины размагничивающих токов.

Рассмотрены варианты импульсной системы с использованием линий с распределенными параметрами при длительности импульса  $\tau \approx 100$  нсек [9].

### Глава III. Связь величины и формы электрического поля с конструкцией и размерами индукционной системы

Решение вопроса о величине и форме электрических полей в области ускорения индукционной системы необходимо для выявления сил, воздействующих на ускоряемый пучок заряженных частиц, а также получения данных, позволяющих решить вопрос о варианте конструкции в зависимости от требований к ускорителю. Получены решения для вихревого электрического поля в наиболее пока распространенной секционированной системе [10, 11]. Вариантом секционированной индукционной системы является беструбочная конструкция [12]. При выводе уравнений для электрического поля исходим из уравнений Максвелла и полагаем, что поскольку в наносекундном диапазоне

$$|\nabla^2 \vec{E}| \sim \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 |\vec{E}|;$$

$$|\epsilon_{\mu} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}| \sim \left(\frac{\pi}{\tau c}\right)^2 |\vec{E}|,$$

то  $\nabla^2 \vec{E} \gg \epsilon_{\mu} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$  и, следовательно, электрическое вихревое поле подчиняется уравнению Лапласа

$$\nabla^2 \vec{E} = 0. \quad \text{II} \quad (12)$$

Решение уравнение (I2) при граничных условиях, соответствующих варианту индукционной системы, в которой зазор между индукторами  $S_1$  много меньше шага системы  $S$ , приводит к выражениям для осевой и радиальной составляющих напряженности вихревого электрического поля:

$$E_z = \sqrt{V} E_a [1 + \sum_1^m E_n I_0(n2\pi r/S) \cos(n2\pi z/S)]; \quad (I3)$$

$$E_r = \sqrt{V} E_a \sum_1^m [E_n I_1(n2\pi r/S) \sin(n2\pi z/S)], \quad (I4)$$

где  $E_n = (-1)^n (4/\pi n \sqrt{V}) \cdot \cos(n\sqrt{\pi}/2) \sin(n\sqrt{\pi}/2) / I_0(n2\pi a/S)$ ,  
 $a$  - внутренний радиус электродов трубки,  $\sqrt{V} = S_1/S$ ,  $E_a = V/S$ ,  
 $I_0$  и  $I_1$  - модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

В диссертации проведен анализ полученных выражений и даются рекомендации по выбору размеров индукционной системы в зависимости от требований, предъявляемых к форме поля. В частности, показано, что силой, обусловленной радиальной составляющей вихревого поля, можно пренебречь по сравнению с силой, обусловленной собственным зарядом пучка, если  $(a/S) > 2,5$ .

Решение уравнения (I2) для варианта индукционной системы, при котором  $\sqrt{V} \approx 1$  и  $r \leq a/2$ , приводит к выражениям:

$$E_z = \sqrt{V} E_a [1 - \sum_1^m E_n I_0(n2\pi r/S) \cos(n2\pi z/S)]; \quad (I5)$$

$$E_r = -\sqrt{V} E_a \sum_1^m [E_n I_1(n2\pi r/S) \sin(n2\pi z/S)]. \quad (I6)$$

Уравнения (I5), (I6) аналогичны (I3), (I4), но если для первого варианта  $I_{1/12} < \sqrt{V} < I_{1/4}$ , то для второго  $0,9 < \sqrt{V} < 0,98$  и, соответственно, значение  $E_T$  примерно на порядок меньше. Т.о., если однородность поля в первом варианте в области, занимаемой пучком, не хуже  $1\%$  при  $(a/S) > 2$ , то во втором-эта же однородность достигается при  $(a/S) > 1,3$ . Но, поскольку  $(r_{tr}/a) \approx 1,3$  для первого

варианта и  $(r_{tr}/a) \approx 2,3$  для второго, то радиальные размеры индукционной системы в обоих случаях примерно одинаковы. При использовании крупногабаритных колец из феррита индукционная система может быть выполнена в виде спирального магнитопровода. Такая система получила название "магнитного соленоида". В диссертации приводятся выражения для электрического вихревого поля "магнитного соленоида", полученные путем использования аналогии между уравнениями, описывающими вихревое электрическое поле, возбуждаемое при изменении индукции в "магнитном соленоиде", и уравнениями, описывающими магнитное поле, возбуждаемое токами, протекающими в соленоиде.

Большое количество вакуумноплотных соединений в секционированной трубке снижает надежность работы ускорителя. То обстоятельство, что почти все соединения находятся внутри индукционной системы, усложняет процесс нахождения течей, особенно, если ускоритель работает при энергии большей 10 МэВ, и наведенная радиоактивность не дает возможности приступить к разборке индукционной системы, пока активность не спадет до допустимого для работы уровня. Этот недостаток устранен в индукционной системе с резистивной ускорительной трубкой. В такой системе пучок ускоряется внутри керамической трубки, на внутреннюю поверхность которой нанесено электропроводящее покрытие, обеспечивающее стекание попадаемых на стенки трубки зарядов. К электропроводящему покрытию предъявляется ряд требований, обусловленных характером работы ЛИУ и прохождением интенсивного электронного пучка. В диссертации выводятся выражения, позволяющие определить требования к величине и однородности электропроводящего покрытия в зависимости от параметров как пучка ускоряемых частиц, так и импульса ускоряющего напряжения [I3]. Показано, что вихревое поле внутри трубки с электропроводящим покрытием постоянно по сечению и имеет только продольную составляющую  $E_z = E_a$ . Это обстоятельство выгодно отличает резистивную трубку, т.е. с электропроводящим или резистивным покрытием, от секцио-



нированной. Поскольку электропроводность покрытия имеет конечную величину, то трубка будет заряжаться до некоторого потенциала, определяемого выражением, полученным в диссертации

$$\varphi = \frac{2 \ell^2 K I_n}{\pi^4 a \sigma_0} \left(1 - e^{-\frac{\pi^2 \sigma_0 A_{гр}}{\varepsilon \ell^2} t}\right) \sin(\pi z / \ell), \quad (17)$$

где  $K$  - коэффициент, характеризующий потери пучка на единицу длины трубки,  $\sigma_0$  - электропроводность квадрата поверхности покрытия,  $A_{гр}$  - конструктивный фактор. Минимальное значение электропроводности покрытия выбирается из условия, чтобы потенциал, до которого заряжается трубка, не превышал значения, при котором происходит электрический пробой трубки или недопустимо искажается ускоряющее поле. Максимальная его величина определяется, исходя из допустимого ослабления поля и допустимого значения тока, протекающего по покрытию. Проведенный анализ показывает, что для электропроводящего покрытия должно выполняться условие  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} < \sigma_0 < 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$ .

В диссертации приведены результаты экспериментального исследования распределения потенциала на внутренней поверхности трубки, подтверждающие характер распределения, задаваемый уравнением (17). Показано, что пучок хорошо проходит внутри резистивной трубки и работа индукционной системы с такой трубкой надежна, пучок стабилен во времени. Помимо требований к величине и равномерности электропроводящего покрытия имеются еще требования и к допустимой мощности, рассеиваемой в покрытии, и к величине напряженности, которую покрытие может выдержать без нарушения целостности. В этой связи проделана работа по разработке состава покрытия и методов его нанесения, при которых обеспечивались бы указанные выше требования [14]. Наиболее приемлемым по электрическим характеристикам является станный покрытие с добавками висмута, наносимое методом пульверизации. Покрытие этого состава, имеющее удельное поверхностное сопротивление  $2 \text{ Ом}/\text{см}^2$ , выдерживало напряженность электрического поля до  $4 \text{ кВ}/\text{см}$  при рассеива-

емой удельной средней мощности до  $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

#### Глава IV. Фокусировка интенсивного электронного пучка при его ускорении в ЛИУ Структура ускоряемого пучка

Без эффективного решения проблемы удержания радиального размера пучка надежная работа ЛИУ, особенно при частоте следования в десятки имп/сек, невозможна, т.к. энергосодержание пучка настолько велико, что даже относительно небольшие потери его способны вызвать разрушение прилежащих к пучку узлов ускорителя. К этому следует добавить, что при использовании ЛИУ в качестве инжектора, к качеству пучка предъявляются жесткие требования, которые могут быть удовлетворены только при надлежащем выборе системы фокусировки и индукционной системы. В диссертации показано, что при энергии пучка до  $3 \pm 5 \text{ МэВ}$  для фокусировки целесообразно использовать продольное магнитное поле. Причем катод должен быть экранирован от магнитного поля с целью получения потока Бриллюэна и, следовательно, наименьшей величины магнитного поля. Получено уравнение, определяющее форму ускоряемого осесимметричного ламинарного пучка в продольном магнитном поле во время следования рабочей части импульса [15]

$$\rho(m_0^2 c^2 + p^2) \frac{d^2 r}{d\rho^2} + p^2 \frac{dr}{d\rho} + \frac{1}{2} r \left(\frac{Bc}{E}\right)^2 \rho = \frac{m_0^2 c^2 I_n}{2\pi \varepsilon_0 e E^2} \cdot \frac{1}{\ell} \quad (18)$$

здесь  $B$  и  $E$  - значения внешних магнитного и электрического полей,

$\rho$  - импульс,  $m_0$  - масса покоя электрона.

Из (18) получается выражение для равновесной траектории  $r$ , ( $\rho$ )

$$r,(\rho) = (m_0 / B) (2 I_n / \pi \varepsilon_0 e \rho)^{1/2} \quad (19)$$

Показано, что при небольших отклонениях начальных условий от равно-

весных и при выполнении неравенств  $\rho^2 \gg m_0^2 c^2$ ,  $2(Vc/E)^2 \gg 1$  пучок устойчив, огибающая его испытывает пульсации, период которых увеличивается по мере роста энергии. Пучок остается устойчивым при любых значениях  $\rho$ , если  $(Vc/E)^2 \gg 10^3$ . В реальной системе распределение магнитного поля вдоль тракта ускорения отличается от однородного. Это обусловлено необходимостью иметь зазоры между создающими магнитное поле катушками для установки вакуумных агрегатов и приборов наблюдения за пучком. В этом случае аналитическое решение (18) затруднено, но возможно его численное решение на ЭВМ, и необходимые параметры фокусирующей системы определяются численным экспериментированием [16].

Для выполнения таких расчетов уравнение (18) приводится к виду

$$\begin{aligned} \ddot{\tau}'' + \frac{E}{2V} \frac{1+2\rho^*V}{1+\rho^*V} \dot{\tau}' + \frac{\rho c^2 B^2}{4V(1+\rho^*V)} \tau - \\ - \frac{I_0^2}{4\sqrt{2}\pi\epsilon_0 \rho^{1/2} \{V(1+\rho^*V)\}^{3/2}} \cdot \frac{1}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\rho = e/m_0$ ,  $\rho^* = e/2m_0 c^2$ ,  $V$  - напряжение, соответствующее энергии частиц.

Поскольку сила, вызывающая распыливание пучка  $\sim 1/\gamma^2$ , то при энергии (3+5) МэВ она уменьшается настолько, что становится возможным использование серии коротких соленоидов (линз), расстояние между которыми увеличивается по мере роста энергии пучка. В диссертации решена задача о фокусировке пучка такой серией линз при учете релятивистского изменения массы [17,18]. В результате численного исследования полученного решения найден критерий устойчивости движения заряженных частиц. Проведено также исследование токопрохождения и выходных параметров пучка в зависимости от изменения параметров различных систем ускорителя. Показано, что допуски на отклонения ускоряющего и магнитного полей, места расположения линз легко могут быть выполнены, что, естественно, облегчает эксплуатацию ускорителей типа ЛИУ.

Известно, что реальные интенсивные пучки имеют неламинарную структуру. В этой связи в диссертации приведены результаты численного исследования токопрохождения неламинарных пучков [9]. Показано, что максимальный радиус огибающей неламинарного пучка больше, чем следует из решения уравнения (18) для ламинарного, но он может быть равным ему, если примерно в 1,5 раза увеличить значение магнитного поля. Показана также неустойчивость внутренней структуры пучка, обусловленная действием нелинейных кулоновских сил. Это приводит к образованию сложного многоскоростного потока со значительной величиной углового разброса. Проведено экспериментальное изучение распределения плотности тока по сечению пучка и углового разброса методом двух щелей. Выяснено, что наиболее равномерное распределение плотности тока имеет место, если магнитное поле в 1,3+1,5 раза превышает бриллюэновское. Распределение плотности существенно зависит от формы магнитного поля в переходной области. По данным, полученным при измерении углового разброса в пучке, построены линии равной интенсивности в плоскости координат  $\tau\tau'$ . Анализ экспериментальных данных показывает, что величина и форма фазовой поверхности также существенно зависят от формы магнитного поля в переходной области и

$\beta\gamma\tau\tau' = (0,05+0,2)$  см рад. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных и показано их удовлетворительное согласие. Поскольку при использовании ЛИУ в качестве инжектора коллективного ускорителя желательно иметь возможно меньшую величину эмиттанса, то проведено изучение возможности улучшения структуры пучка путем введения магнитного поля в области катода источника электронов [20]. Показано, что при неэкранированном катоде величина эмиттанса может быть уменьшена по сравнению с его величиной при экранированном катоде, но величина магнитного поля должна в 2+3 раза превышать бриллюэновское значение, что существенно увеличивает мощность системы электропитания.

## Глава У. Конструкция, исследование, опыт эксплуатации ускорителей типа ЛИУ

Результаты работ, изложенных в диссертации, в той или иной мере воплощены в разработанных в НИИЭФА им.Д.В.Ефремова линейных индукционных ускорителях. Уникальным по энергии ускоренного пучка и частоте повторения импульсов является ускоритель ЛИУ-30/250, сооружаемый для Объединенного института ядерных исследований [21,22,23].

Основные его параметры:

энергия ускоренного пучка электронов	- 30 МэВ;
ток пучка в импульсе	- 250 А;
длительность плоской части импульса тока	- 0,5 мсек;
частота повторения импульсов	- $0,5 \cdot 10^6$ имп/сек.

Конструкция систем ускорителя и его компоновка, рис.3, учитывают то, что работа ускорителя будет сопровождаться большим потоком нейтронной радиации. С целью отработки конструкции ускорителя и проведения комплексных исследований по взаимодействию систем ЛИУ была создана и эксплуатируется более 2-х лет начальная часть этого ускорителя, получившая название ЛИУ-0,75/250 [24]. Ускоритель состоит из источника электронов с энергией пучка до 300 кэВ и двух секций, в каждой из которых достигается приращение энергии до 250 кэВ, рис.2. В процессе эксплуатации ЛИУ-0,75/250 получены экспериментальные результаты, которые приведены в диссертации. В частности, выявлена оптимальная форма магнитного поля в переходной области, при которой достигнуты проектные параметры пучка и хорошее токопрохождение, и получены данные по взаимодействию электронного пучка с индукционной системой как с секционированной, так и с резистивной ускорительными трубами.

Уникальным в своем классе по величине тока ускоряемого пучка является ускоритель ЛИУ-5/5000 (рис. 4), ток пучка в котором должен существенно превосходить достигнутые значения на других ускорителях этого типа [25].

Основные параметры:

энергия ускоренного пучка	- 5 МэВ;
ток пучка в импульсе	- 5 кА;
длительность плоской части импульса	- 50 нсек;
длина ускорителя	- 10 м.

В каждой из 6 секций этого ускорителя должно достигаться приращение энергии пучка 0,75 МэВ. Источник электронов рассчитан на энергию 0,5 МэВ. Он имеет электронную пушку с оксидным катодом, разработанным в НИИЭФА им.Д.В.Ефремова [25].

Далее, в диссертации приводятся результаты экспериментальных работ, выполненных в связи с разработкой ускорителя типа ЛИУ для скважинного генератора гамма-квантов [26,27].

Параметры ускорителя:

энергия ускоренного пучка электронов	- 0,5 МэВ;
ток пучка в импульсе	- 50 А;
длительность плоской части импульса	- 70 нсек;
частота повторения импульсов	- до $15 \cdot 10^6$ имп/сек;
максимальный диаметр всех систем	- 90 мм.

На основе анализа приведенных в диссертации результатов исследования лабораторного образца ускорителя делается вывод о возможности создания ЛИУ в скважинном варианте.

В процессе работы над ускорителями ЛИУ-30/250 и ЛИУ-5/5000 было предложено ряд оригинальных конструктивных решений, направленных на достижение указанных выше параметров [28 + 32].

## З а к л ю ч е н и е

В результате выполненной и изложенной в диссертации работы решен комплекс вопросов, связанных с разработкой линейных индукционных ускорителей – новых генераторов интенсивных пучков релятивистских электронов.

I. Предложено использовать для расчета ферромагнитных сердечников индукционной системы теорию импульсного перемagnичивания. Получены расчетные соотношения и показано хорошее согласие теории с экспериментом.

2. Получены экспериментальные динамические кривые перемagnичивания магнитомягких сплавов и ферритов в функции размагничивающего поля при длительности импульса 500, 250, 150 нсек. На основе расчетных и экспериментальных данных определена зависимость к.п.д. индукционной системы от параметров импульса тока ускоряемого пучка и типа ферромагнетика. Даны рекомендации по выбору материала сердечников в зависимости от требований, предъявляемых к ускорителю.

3. Разработана эквивалентная схема ускоряющей системы, в которой ферромагнитный сердечник представлен нелинейным сопротивлением. Получены характеристики основных элементов, входящих в схему.

4. Показано, что при длительности импульса в сотни нсек и повышенной частоте повторения импульсов целесообразно использовать в ускоряющей системе неоднородную формирующую линию с бумагопленочными конденсаторами, разработанными в НПО "Позитрон" для ЛИУ, в сочетании с импульсным водородным тиратроном.

5. Экспериментально выявлены формирующие свойства индукционной системы и даны рекомендации по преобразованию формы импульса ускоряющего напряжения длительностью в десятки нсек.

6. Получены выражения, связывающие форму ускоряющего поля с вариантами и размерами индукционной системы.

7. Предложен ЛИУ с резистивной ускорительной трубкой. Сформулированы требования к электропроводящему покрытию, осуществлена разработка резистивной трубки, и экспериментально показана работоспособность предложенного варианта ускорителя.

8. Получено уравнение для отгибающей ламинарного ускоряемого пучка, фокусируемого продольным магнитным полем или серией коротких соленоидов при экранированном катоде. Получены аналитические выражения для отгибающей пучка в случае однородного фокусирующего поля и путем численного экспериментирования определены допустимые отклонения параметров как ускоряющей системы, так и фокусирующей, при которых сохраняется устойчивость пучка.

9. Экспериментально исследована зависимость распределения плотности тока и величины эмиттанса от величины и формы магнитного поля и показано, что в случае экранированного катода определяющее значение имеет форма магнитного поля в переходной области. Показано, что структура пучка становится более устойчивой при введении магнитного поля в область катода, величина магнитного поля должна в 2-3 раза превышать бриллюэновское значение.

10. Обобщен опыт, накопленный при разработке линейных индукционных ускорителей в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Предложены новые решения конструкций систем и узлов, способствующие улучшению параметров и расширяющие возможности ускорителей типа ЛИУ.

II. Получены результаты комплексного исследования взаимодействия систем на ускорителе ЛИУ-0,75/250. В процессе двухлетней эксплуатации ускорителя показана надежность разработанных систем. Выявлена связь между параметрами ускоряемого пучка и формой импульса ускоряющего напряжения.

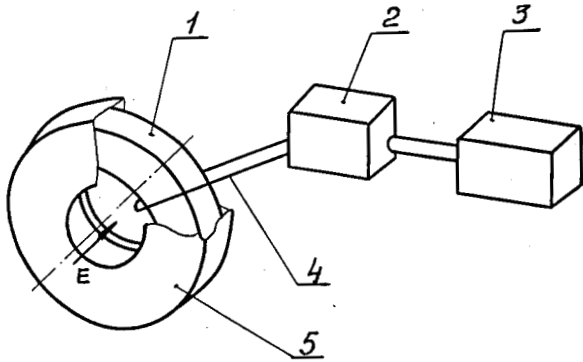


Рис.1. Упрощенная схема ЛИУ.

- 1 - ферромагнитный сердечник;
- 2 - импульсный генератор;
- 3 - источник электроэнергии;
- 4 - первичная обмотка;
- 5 - вторичная обмотка (ускоряющий промежуток)

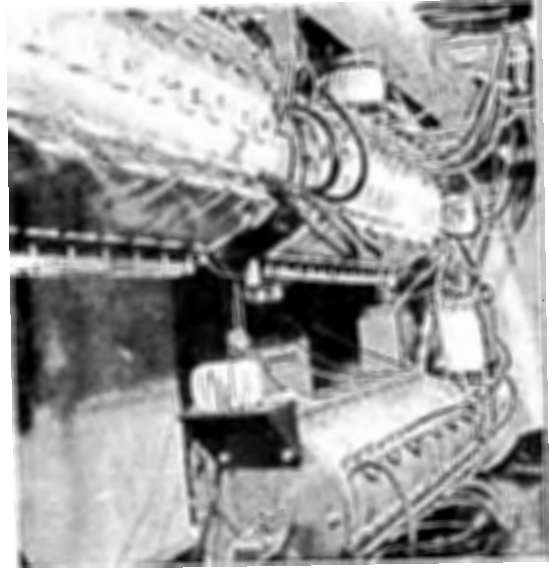


Рис.2. Ускоритель ЛИУ-0,75/250.

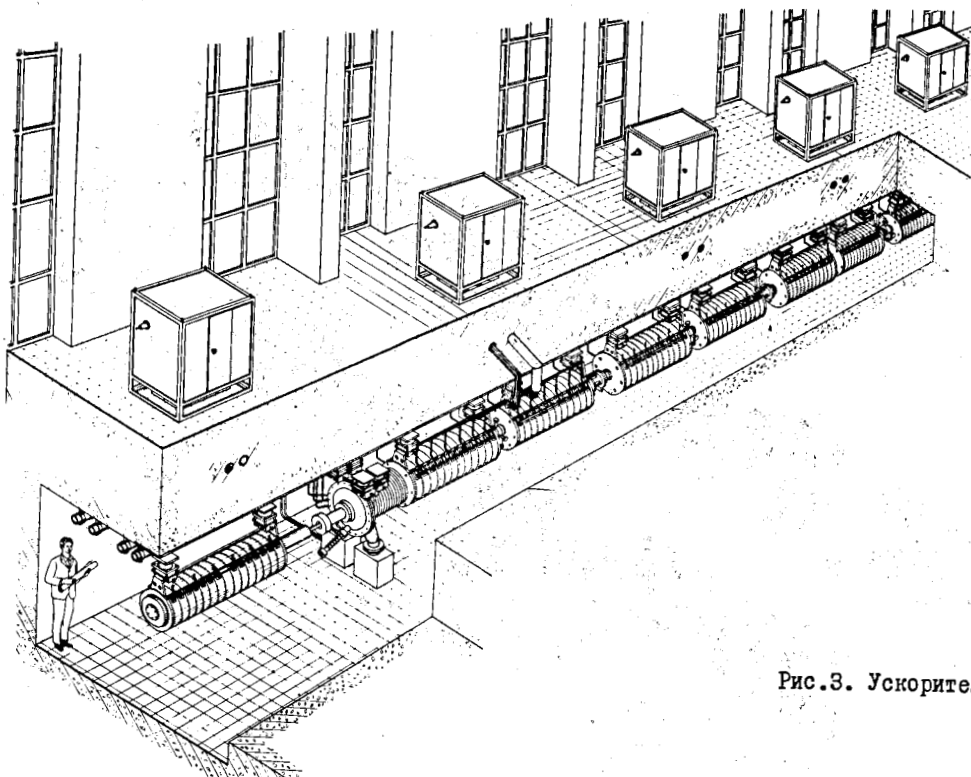


Рис.3. Ускоритель ЛИУ-30/250.

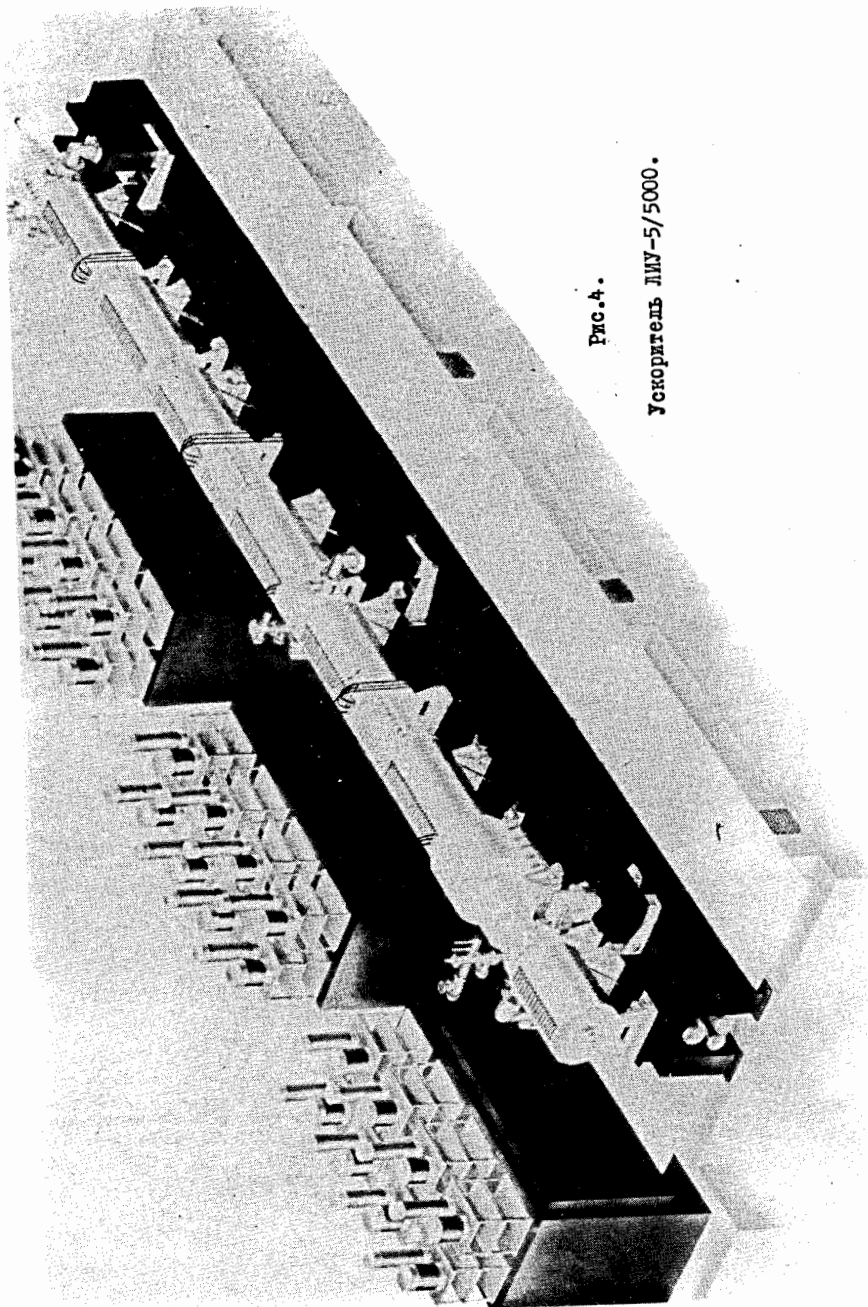


Рис. 4.

Ускоритель ЛЛУ-5/5000.

## Л и т е р а т у р а

1. М.А.Марков, У.Ф.Н., III, вып.4, 719, (1973).
2. Ю.П.Вахрушин, "Состояние и перспективы развития линейных индукционных ускорителей", доклад на конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей", Томск, 5-7 сентября 1972 г. (в кн. Тезисы докладов, Томск, 1972, стр.37).
3. Ю.П.Вахрушин, И.М.Матора. У.Ф.Н., II, вып. I, II5 (1973).
4. А.И.Анацкий, Н.А.Бурцева, Ю.П.Вахрушин, И.М.Матора, К.Д.Мартьянова. Препринт ОИЯИ, Р9-6075, Дубна, 1971.
5. А.И.Анацкий, Н.А.Бурцева, Ю.П.Вахрушин, Е.П.Хальчицкий. В сборнике "Электрофизическая аппаратура", выпуск 10, стр.24, Атомиздат, 1973.
6. А.И.Анацкий, Н.А.Бурцева, Ю.П.Вахрушин. В сборнике "Электрофизическая аппаратура", выпуск II, стр.21, Атомиздат, 1974.
7. А.И.Анацкий, Н.А.Бурцева, Ю.П.Вахрушин. "О выборе ферромагнетика для линейного индукционного ускорителя", доклад на конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей", Томск, 5-7 сентября 1972 г. (в книге Тезисы докладов, Томск, стр.38, 1972).
8. Ю.П.Вахрушин, Препринт НИИЭФА, А-0173, 1973.
9. А.И.Анацкий, Ю.П.Вахрушин, В.М.Караморин, Е.П.Хальчицкий. "К вопросу формирования прямоугольного импульса ускоряющего напряжения в сильноточном линейном индукционном ускорителе", доклад на конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей", Томск, 5-7 сентября 1972 г. (в книге Тезисы докладов, Томск, стр.38, 1972).

10. Ю.П.Вахрушин, В.П.Саранцев, О.В.Семенов.  
Препринт ОИЯИ, 9-3287-2, Дубна, 1967.
11. Ю.П.Вахрушин, О.В.Семенов. ЖТФ, 38, 1521 (1968).
12. А.И.Анацкий, О.С.Богданов, Ю.П.Вахрушин и др. АЭ, 21, 439 (1966).
13. Ю.П.Вахрушин, В.К.Гаген-Торн. ЖТФ, 42, 1446 (1972).
14. Р.А.Алексеев, Ю.П.Вахрушин и др.  
В книге "Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц" (Москва, 2-4 октября 1972 г.).  
Том II, стр.253, "Наука", М., 1973.
15. Ю.П.Вахрушин, В.С.Кузнецов. ЖТФ, 39, 506, (1969).
16. Ю.П.Вахрушин и др., Препринт ОИЯИ, Р9-5714, Дубна, 1971.
17. Ю.П.Вахрушин, В.С.Кузнецов, О.Л.Комаров.  
В книге "Труды УП Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий", (Ереван, 27 августа - 2 сентября 1969 г.). Том I, стр.173, АН Арм.ССР, Ереван, 1970.
18. Ю.П.Вахрушин и др., АЭ, 31, 294, (1971).
19. В.И.Богданова, Ю.П.Вахрушин и др.  
Препринт НИИЭФА, № А-0200, Ленинград, 1974.
20. В.С.Кузнецов, Ю.П.Вахрушин, О.Л.Комаров, Р.П.Фидельская.  
ЖТФ, 44, 1385, (1974).
21. В.Д.Анатъев, Ю.П.Вахрушин и др.  
Препринт ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
22. A.I.Anatsky, J.P.Vachrushin et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-18, p.635 (1971).

23. О.С.Богданов, Ю.П.Вахрушин и др. В книге "Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (II-18 ноября 1970 г.)", Том.П, М., "Наука", стр.172, 1972.
24. О.С.Богданов, Ю.П.Вахрушин и др. В книге "Симпозиум по коллективным методам ускорения (27-30 сентября 1972 г.)", Дубна, ОИЯИ, Д9-6707, стр.152, 1972.
25. А.И.Анацкий, Ю.П.Вахрушин и др. В книге "Симпозиум по коллективным методам ускорения (27-30 сентября 1972 г.)", Дубна, ОИЯИ, Д9-6707, стр.158, 1972.
26. А.И.Анацкий, Ю.П.Вахрушин, А.П.Грумбков, Н.С.Гусева.  
В книге "Тезисы докладов научно-технической конференции "Задачи геофизического приборостроения в свете решений XXIV съезда КПСС", "Недра", стр.55, 1972.
27. А.И.Анацкий, Ю.П.Вахрушин, А.П.Грумбков, Н.И.Колесов.  
"Малогабаритный линейный индукционный ускоритель", доклад на конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей". (Томск, 5-7 сентября 1972 г.). В книге "Тезисы докладов", Томск, стр.39, 1972.
28. Ю.П.Вахрушин и др. Авторское свидетельство № 196202, Б.И. № II, 1968, стр. 193.
29. Ю.П.Вахрушин и др. Авторское свидетельство № 256903, Б.И. № 35, 1969, стр. 51.
30. Ю.П.Вахрушин, Н.И.Колесов, А.Г.Сорокин.  
Авторское свидетельство № 272453, Б.И. № 19, 1970, стр. 64.
31. А.И.Анацкий, П.В.Букаев, Ю.П.Вахрушин, Е.П.Хальчицкий.  
Авторское свидетельство № 322136, Б.И. № 15, 1974, стр. 218.
32. Ю.П.Вахрушин и др. Авторское свидетельство № 326163, Б.И. № 4, 1972, стр. 72.  
Рукопись поступила в издательский отдел  
18 июля 1974 года.