

## ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА ВНЕШНЕЙ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА СКОРОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Васильева О.В.<sup>1</sup>, Будько А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

В работе описывается влияние индуктивности соленоида коаксиального магнитоплазменного ускорителя на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы для двух различных моделей ускорителя. Исследование осуществлялось на примере модельных коаксиальных магнитоплазменных ускорителей, соответствующих реально используемым на практике устройствам. Индуктивность индуктора рассчитывалась на основе расчета энергии магнитостатического поля. Определено ее оптимальное значение для двух моделей, при котором величина кинетической энергии достигает максимального значения. Рассчитана минимально допустимая величина индуктивности соленоида внешней индукционной системы, ниже которой проявляются высокочастотные составляющие тока. Показано положительное и отрицательное влияние величины индуктивности индуктора на скорость плазменной струи. Дано представление об относительных вкладах различных видов энергий в формирование процесса и влиянии различных типов диссипации энергии, процессов переноса и трансформаций одного вида энергии в другой. В качестве правильности работы алгоритма проведен расчет баланса энергии рассматриваемой системы.

Ключевые слова: магнитоплазменный ускоритель, плазменный жгут, магнитное поле, эрозия металла, математическое моделирование, индуктивность соленоида, кинетическая энергия, баланс энергии.

## INFLUENCE OF THE SOLENOID INDUCTANCE EXTERNAL INDUCTION SYSTEM OF THE COAXIAL MAGNETOPLASMA ACCELERATOR ON THE SPEED OF THE PLASMA STREAM

Vasileva O.V.<sup>1</sup>, Budko A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

The article describes an effect of the solenoid inductance of the coaxial magneto plasma accelerator on the contribution of the kinetic energy in the initial energy of the system for two different models of the accelerator. The study was carried out for model coaxial magneto plasma accelerator, the corresponding actual devices used in practice. The solenoid inductance was calculated on the basis of calculating the energy of the magneto static field. The optimal value of the solenoid inductance for the two models, in which the kinetic energy reaches a maximum value, was determined. The minimum permissible value of the solenoid inductance of external induction system, below which the high frequency components of the current appeared, was calculated. The positive and negative influence of the solenoid inductance value on plasma jet speed was shown. An idea of the relative contribution of different types of energy in the formation process and the impact of different types of energy dissipation processes of transport and transformation of one form of energy into another was given. As the correctness of the algorithm the energy balance of the system was calculated.

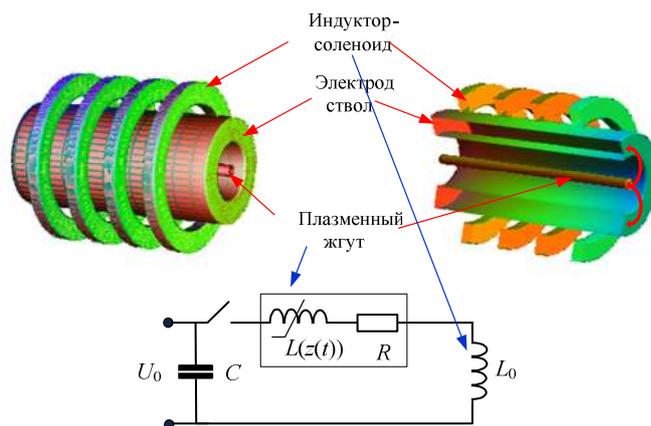
Keywords: magneto plasma accelerator, plasma harness, magnetic field, erosion of the metal, mathematical modeling, solenoid inductance, kinetic energy, balance of energy.

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель является электроэрозийным ускорителем, так как рабочий материал нарабатывается электроэрозийным путем с поверхности ускорительного канала [4, 6]. На рисунках 1, 2 представлены упрощенные модели коаксиальных магнитоплазменных ускорителей (КМПУ). Для описания процессов происходящих в КМПУ представим их как электромеханические устройства, считая, что масса и сопротивление плазмы  $R$  постоянны, с емкостью  $C$  и напряжением  $U_0$ . Сгусток

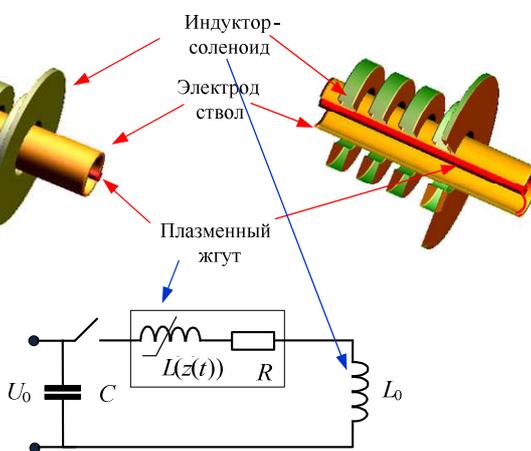
представляется как недеформируемая проводящая перемычка, ускоряемая силами магнитного давления собственных токов, протекающих в ускорителях через перемычку.

### Методика

Будем считать, что плазменный сгусток локализован и устойчив в процессе ускорения его как единого целого. Индуктивность индуктора  $L_0$  рассчитана на основе расчета энергии магнитостатического поля [1, 5]. Индуктивность плазменного жгута  $L'$  записана в виде линейной функции координаты распространения, где погонная индуктивность была рассчитана на основе [2, 3].



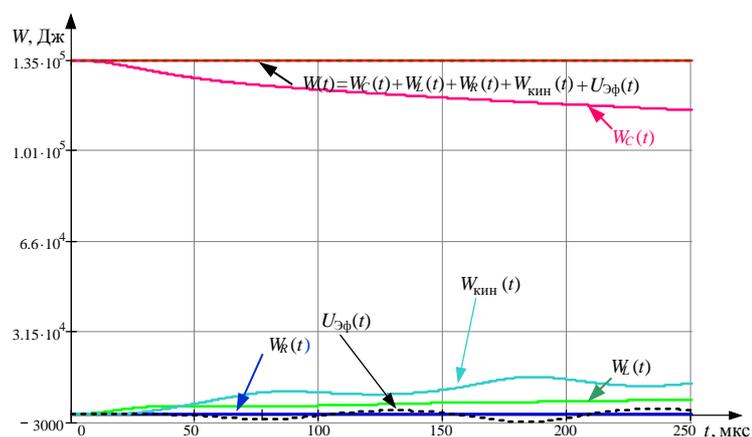
**Рис. 1.** Модель №1 с параметрами:  $C=30 \cdot 10^{-3} \Phi$ ,  $L_0=8,764 \cdot 10^{-7} \text{Гн}$ ,  $L'=4,6 \cdot 10^{-7} \text{Гн}$ ,  $U_0=3 \text{кВ}$



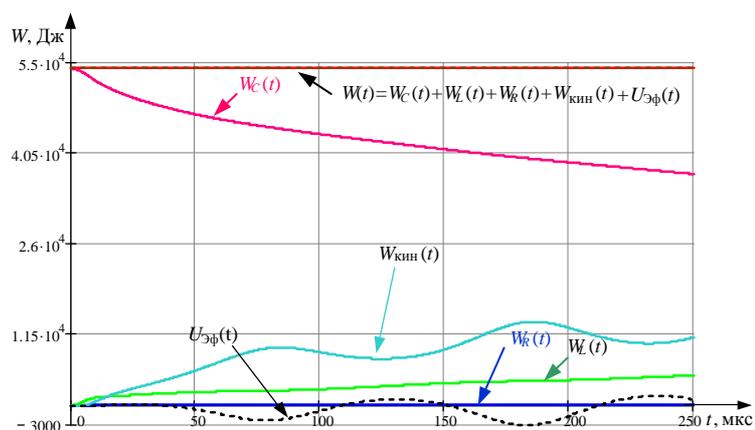
**Рис. 2.** Модель №2 с параметрами:  $C=12 \cdot 10^{-3} \Phi$ ,  $L_0=1,722 \cdot 10^{-7} \text{Гн}$ ,  $L'=4,6 \cdot 10^{-7} \text{Гн}$ ,  $U_0=3 \text{кВ}$

### Экспериментальная часть

Для сравнения двух используемых моделей, приведем значения вклада кинетических энергий  $W_{\text{кин}}$  в исходную энергию системы  $W_0$  (рис. 3).



а



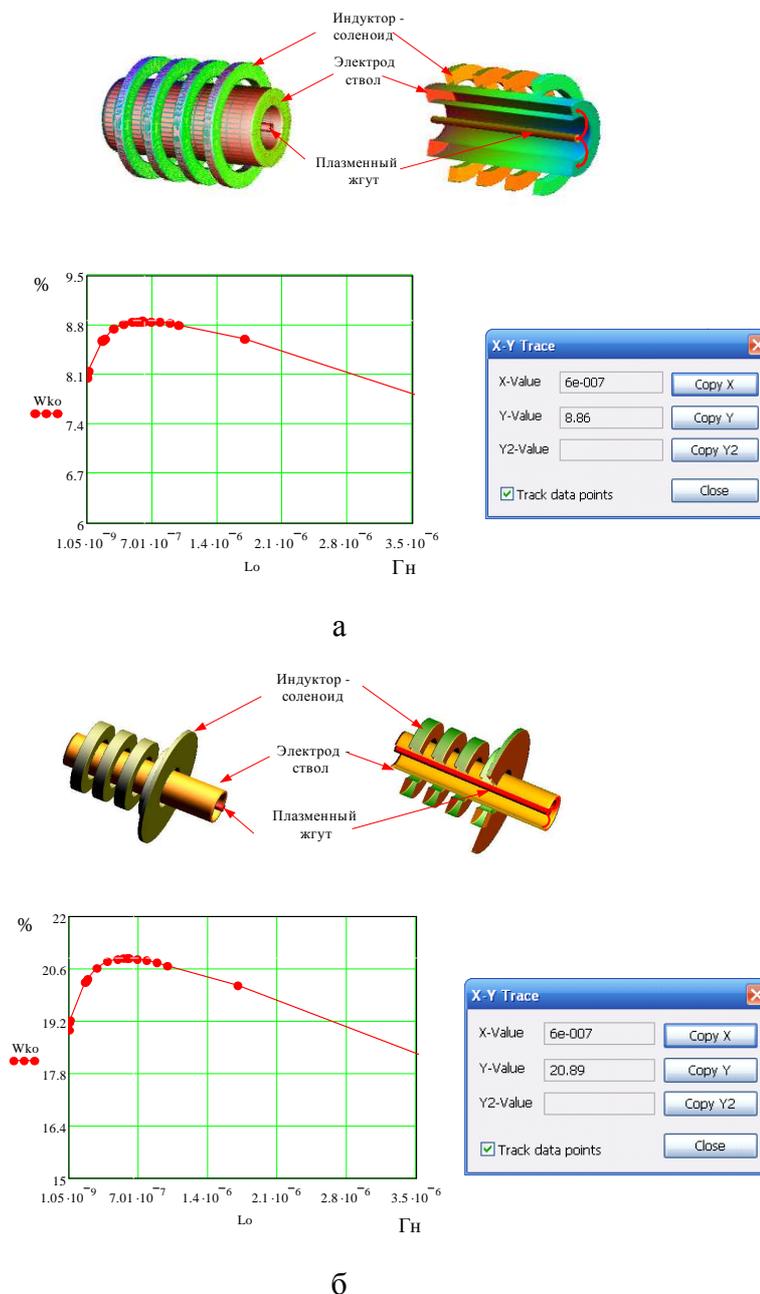
б

**Рис. 3.** Вклад кинетической энергии в исходную энергию системы в сравнении:

а) модель №1 –  $W_{кин} \cdot 100\% / W_0 = 8,3\%$ ; б) модель №2 –  $W_{кин} \cdot 100\% / W_0 = 20,2\%$

Таким образом, из полученных графиков можно сделать следующий вывод. С увеличением индуктивности индуктора увеличивается поперечная составляющая скорости, что положительно влияет на эрозию металлов и получение ультрадисперсных порошков, уменьшается скорость изменения тока, стабилизируется ток и плазма в ускорительном канале. С уменьшением индуктивности индуктора увеличивается кинетическая энергия системы, тем самым увеличивая скорость плазменного сгустка.

Ниже на рисунке 4 представлено влияние индуктивности индуктора КМПУ на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы.



**Рис. 4.** Влияние индуктивности индуктора КМПУ на вклад кинетической энергии в исходную энергию системы в сравнении, где  $W_{k0} = W_{кин} \cdot 100\% / W_0$ ,  $L_{0min} = 1,05 \cdot 10^{-9}$  Гн:

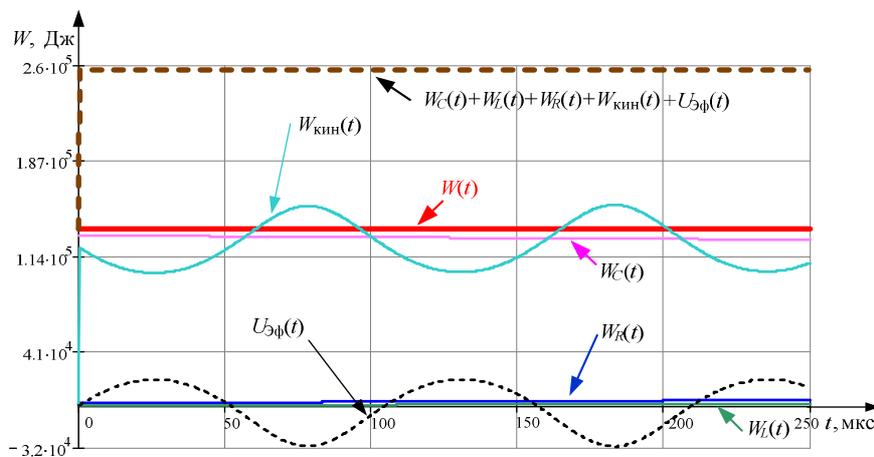
а) модель №1; б) модель №2

Из рисунка видно, что оптимальное значение индуктивности индуктора для двух моделей КМПУ равно  $L_0 = 6 \cdot 10^{-7}$  Гн. При этом значении величина кинетической энергии для модели №1 КМПУ достигает максимального значения  $W_{кин} = 8,86\%$ , а для модели №2 –  $W_{кин} = 20,89\%$ . Таким образом, для модели №1 оптимальное значение индуктивности индуктора позволит повысить скорость плазменной струи на срезе ускорительного канала с 4,3 км/с до 4,8 км/с, для модели №2 – с 9,5 км/с до 9,93 км/с [5].

Снижение кинетической энергии в диапазоне индуктивности  $L_0 = (1,05 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-7})$  Гн обусловлена тем, что при значительном уменьшении индуктивности индуктора

увеличивается скорость изменения, неустойчивость плазмы. Высокочастотные составляющие тока проявляются при величине индуктивности меньше минимально допустимого значения  $L_{0min}=1,05 \cdot 10^{-9}$  Гн. Величина минимальной индуктивности определялась из условия отсутствия высокочастотных составляющих тока при расчете баланса энергии вариационным методом.

На рисунке 5 представлен дисбаланс энергии, при котором проявляются высокочастотные составляющие тока, где:  $W(t)$  - общая энергия системы,  $W_C(t)$  - электрическая энергия конденсатора,  $W_L(t)$  - магнитная энергия катушки,  $W_R(t)$  - омическая энергия потерь,  $W_{кин}(t)$  - кинетическая энергия,  $U_{Эф}(t)$  - эффективная потенциальная энергия [5].



**Рис. 5.** Дисбаланс, при котором проявляются высокочастотные составляющие тока  $W(t) \neq$

$$W_C(t) + W_L(t) + W_R(t) + W_{кин}(t) + U_{Эф}(t)$$

Ниже приводится таблица сравнения экспериментальных и расчетных данных.

**Таблица 1**

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Величина	Эксперимент	Теория
Индуктивность $L_0$ , Гн	$(2-9) \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Скорость $v$ , км/с	4,3-9,5	4,8-9,93
Временная длительность процесса $t$ , мкс	240	250

Таким образом, модель правильно отражает тенденцию изменения процесса.

Рассчитана минимально допустимая величина индуктивности индуктора КМПУ, ниже которой проявляются высокочастотные составляющие тока. Показано положительное и отрицательное влияние величины индуктивности на скорость плазменной струи.

Дано полное представление об относительных вкладах различных видов энергий в формирование процесса и влиянии различных типов диссипации энергии, процессов переноса и трансформаций одного вида энергии в другой.

## Результаты

Разработанный алгоритм численно-аналитического моделирования позволяет оптимизировать электромагнитную систему и показать возможность повышения кинетических параметров плазменного течения, скорости плазменной струи в свободном пространстве, скорости закалки при распылении материала за счет изменения величины индуктивности соленоида при прочих равных условиях.

Сравнительные численные эксперименты показали необходимость уменьшить величину индуктивности внешнего соленоида модели №1 и увеличить величину индуктивности модели №2 для повышения скорости плазменной струи на срезе ускорительного канала. Повышение начальной скорости плазменной струи при ее истечении в объем с азотной атмосферой может обеспечить получение нанодисперсного порошка с уменьшенным средним размером частиц.

## Список литературы

1. Васильева О.В., Исаев Ю.Н., Колчанова В.А. Расчет индуктивности на основе расчета электромагнитного поля // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Томск, 13-16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 381–384.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 2: Теория поля. – М.: Наука, 1992. – 533 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 1: Механика. – М.: Наука, 1992. – 222 с.
4. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозийная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. – 2005. – № 6. – С. 25–33.
5. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Купцов А.М. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – т. 317, № 4. – С. 33–41.
6. Сивков А.А., Корольков В.Л., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя // Электротехника. – 2003. – № 8. – С. 41–46.

## Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., заведующий кафедрой ЭПП ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ»,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;  
Курец В.И., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ»,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.