

ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

MAGNETO-CUMULATIVE TRANSFORMER FACILITY FOR MATERIALS STUDY AT MEGABAR PRESSURES

*А. С. Пикарь, М. А. Виденькин, Е. Н. Киришанова, М. В. Климашов, Е. Ю. Климов,
П. В. Королев, Д. А. Толшмяков*

*A. S. Pikar, M. A. Videnkin, E. N. Kirshanova, M. V. Klimashov, E. Y. Klimov,
P. V. Korolev, D. A. Tolshmyakov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Рассматривается стационарный экспериментальный стенд, предназначенный для проведения экспериментов по исследованию материалов при мегабарных давлениях.

Взрывомагнитный трансформаторный стенд состоит из соединенных параллельно четырех высоковольтных трансформаторов, коаксиального индуктивного накопителя, взрывного плазменного размыкателя, взрывного разрядника-коммутатора, промежуточного электрода и индуктивной нагрузки. Стенд запитывается от конденсаторной батареи с максимальным энергозапасом до 1,8 МДж (9 мФ, 20 кВ, 60 нГн). Четыре кабельных трансформатора намотанные кабелем КВИ-150 в два слоя по 14 витков на длине 350 мм, соединены параллельно. Взрывной размыкатель диаметром 200 мм при длине плазменного канала 10 мм обеспечивает коммутацию 6 МА импульсов тока из индуктивности 10 нГн накопителя на нагрузку с индуктивностью 2–3 нГн за время 0,5 мкс. Давление в исследуемых образцах до 100 ГПа создается четырьмя плоскими алюминиевым поршнями шириной по 5 мм и толщиной 1 мм.

The stationary experimental facility is considered in this report. It is intended for the experiments regarding the materials study at megabar pressures. The facility construction arrangement is described. The numerical calculations results of the facility operation are provided. The preliminary experimental results of the main elements testing are presented.

The magneto-cumulative transformer facility consists of four high-voltage transformers connected in parallel, coaxial inductive storage, explosive plasma opening switch, explosive low inductive commutator, intermediate electrode, and inductive load. The facility is powered from a capacitor bank with maximum energy storage up to 1.8 MJ (9mF, 20 kV, 60 nH). The inductance of the coaxial cables together with a coaxial collector of 400 mm diameter is not higher than 100 nH. Four cable transformers with an internal diameter of 220 mm coiled by the cable KVI-150 in two layers with 14 coils on the 350 mm length are connected in parallel by means of steel plates coated by copper of 2 mm thickness. The inductance of the primary circuit of the transformer facility is 230 nH. The secondary coil of the transformer is made of the cable armature and has the inductance of 1.5 nH. The inductance of the mutual induction is 25 nH.

The explosive opening switch of 200 mm diameter at the length of the plasma channel of 10 mm provides the switching of the current pulses of 6 MA into the load with the inductance from 2 up to 3 nH for the time of 0.5 μ s. The pressure up to 100 GPa in the testing object is created by a flat conducting aluminum piston of 1 mm thickness.

Введение

Для исследования материалов при мегабарных давлениях используются, как правило, либо одно-разовые взрывные устройства [1], либо стационарные электрофизические установки с мощной энергетикой [2]. Взрывные устройства обладают тем преимуществом, что они имеют сравнительно небольшие размеры, но их использование ограничено из-за разрушающего действия заряда взрыв-

нарные электрофизические установки с мощной энергетикой [2]. Взрывные устройства обладают тем преимуществом, что они имеют сравнительно небольшие размеры, но их использование ограничено из-за разрушающего действия заряда взрыв-

чатого вещества (ВВ). Мощные стационарные электрофизические установки позволяют проводить большое количество экспериментов и главное с более высокой точностью, но их создание и эксплуатация требуют огромных финансовых затрат. Мы пошли по пути создания гибридной установки, у которой требуемая энергетика обеспечивается стационарной конденсаторной батареей, а малая длительность токового импульса формируется взрывным размыкателем. Такая схема позволяет одновременно использовать преимущества, как взрывных, так и стационарных установок. Стационарная конденсаторная батарея обеспечивает большое количество выстрелов, а взрывной размыкатель, ввиду незначительного количества ВВ, разрушает лишь небольшую часть устройства и часть нагрузки, при этом наиболее трудоемкая и дорогостоящая часть установки сохраняется.

Описание взрывомагнитного трансформаторного стенда

Стенд предназначен для формирования токового импульса стационарной конденсаторной батареи, путем накопления электрической энергии в индуктивном накопителе за сравнительно большое время, на уровне 200–250 мкс, с последующим сокращением длительности токового импульса до 0,5–1 мкс взрывным плазменным размыкателем. Сформированный импульс амплитудой до 8 МА перебрасывается в индуктивную нагрузку в виде коаксиала с внешним токопроводом из четырех плоских алюминиевых пластин толщиной 1 мм. Такая схема эксперимента позволяет решить сразу несколько проблем связанных с созданием электрофизических установок мегабарного диапазона давлений. Во-первых, использование индуктивного накопителя и взрывного размыкателя снимает ограничение на быстроходность емкостной батареи. Батарея может иметь сравнительные низковольтные конденсаторы со временем работы до нескольких сотен микросекунд. Во-вторых, понижение импеданса с помощью трансформаторов позволяет передавать мегаамперные токи на сравнительно большое расстояние и работать с малоиндуктивными нагрузками. В-третьих, стенд является многократным, разрушается лишь небольшая часть установки, а именно: взрывной разрядник-коммутатор, взрывной размыкатель тока и нагрузка. Перенос взрывного размыкателя максимально близко к нагрузке и подсоединение нагрузки перед моментом разрыва токового контура перед размыкателем позволяет существенно уменьшить напряжение на нагрузке. Кроме того, такая схема

позволяет производить ускорение ударника во внешнем магнитном поле токопровода индуктивного накопителя, что дает выигрыш в величине максимально достижимой амплитуды давления на исследуемый образец. Стенд выполнен в транспортном варианте, и может работать с конденсаторными батареями различной емкости и энергетикой.

Фотография экспериментального стенда, во время подготовки к работе на полигоне, приведена на рис. 1.

Взрывомагнитный трансформаторный стенд состоит из соединенных параллельно четырех высоковольтных катушек трансформатора, коаксиального индуктивного накопителя, взрывного плазменного размыкателя, взрывного малоиндуктивного разрядника-коммутатора, промежуточного электрода и индуктивной нагрузки. Стенд запитывается от конденсаторной батареи с максимальным энергозапасом до 1,8 МДж (9 мФ, 20 кВ, 200 нГн, 4 МОм).

Индуктивность 30-и подводящих коаксиальных кабелей вместе с коаксиальным коллектором диаметром 400 мм не превышает 100 нГн, омическое сопротивление 2 МОм. Четыре кабельных трансформатора с внутренним диаметром 220 мм, намотанные кабелем КВИ-150 в два слоя по 14 витков на длине 350 мм, соединены параллельно с помощью стальных пластин, облицованных медью, толщиной 2 мм.

Индуктивность первичной цепи трансформаторной сборки – 250 нГн. Для первичной цепи трансформатора вместе с батареей и кабельной линией имеем индуктивность 550 нГн. Вторичная обмотка трансформатора образована оплеткой высоковольтного кабеля и имеет индуктивность взаимоиндукции 25 нГн. Паразитная индуктивность вторичной обмотки трансформатора, образованной токопроводящими шинами – 1,25 нГн.

Взрывной размыкатель диаметром 200 мм при длине плазменного канала 10–12 мм обеспечивает коммутацию 6–8 МА импульсов тока на нагрузку с индуктивностью 2–3 нГн за время 0,5–1 мкс. Давление в исследуемом образце до 100 ГПа создается плоским токопроводящим алюминиевым поршнем толщиной 1 мм.

Оценочные расчеты при работе стенда на индуктивный накопитель

На рис. 2 приведена эквивалентная электрическая схема трансформаторного стенда с индуктивным накопителем 10 нГн, приведенная к вторич-

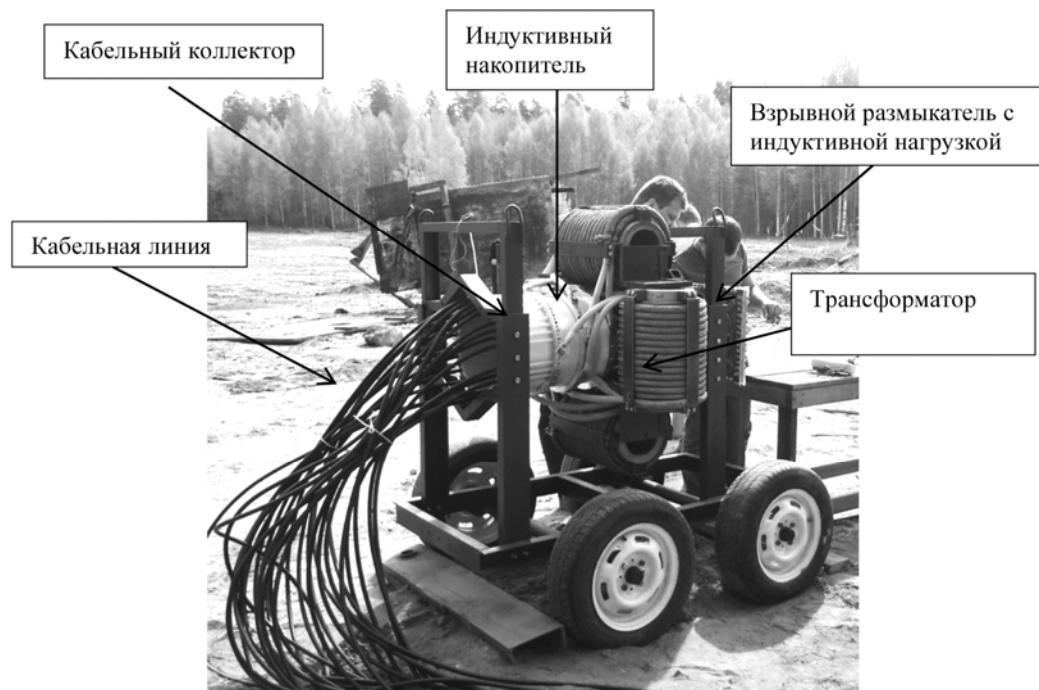


Рис. 1. Внешний вид стационарного экспериментального стенда

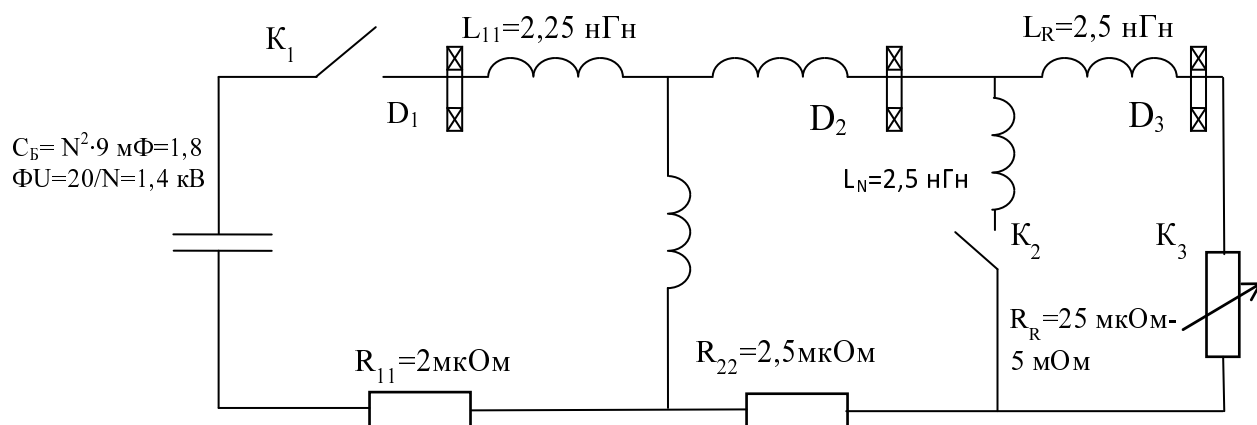


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема трансформаторного стенда

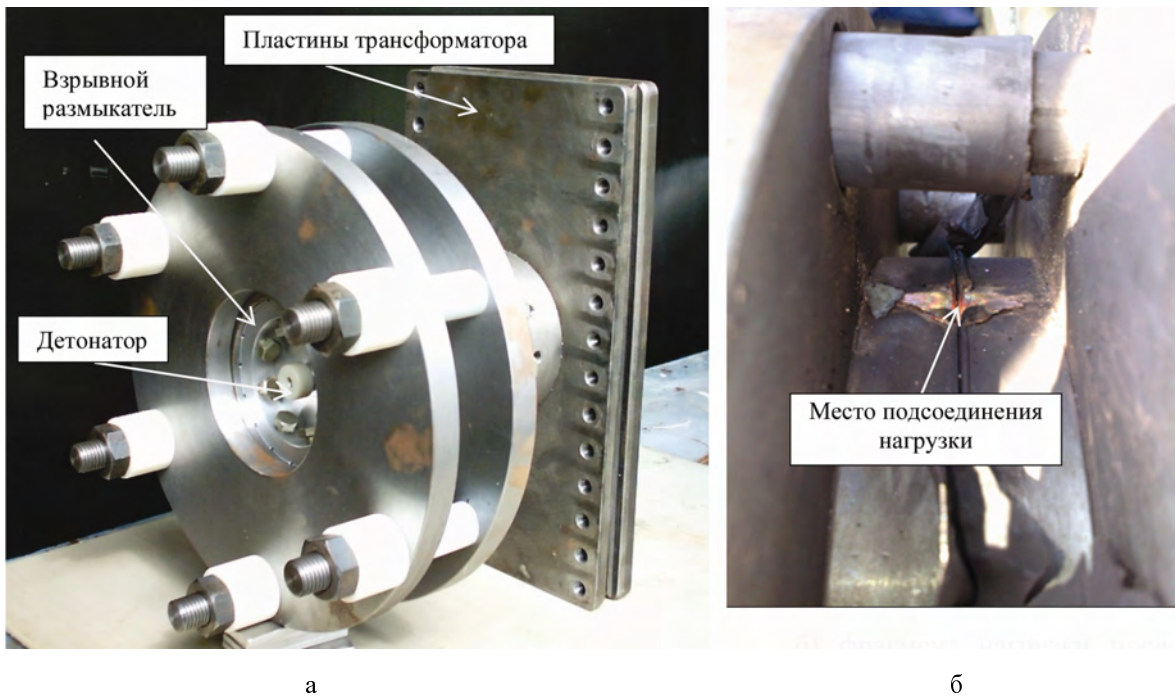
ной цепи – цепи нагрузки, при коэффициенте трансформации 14.

Эквивалентная емкость конденсаторной батареи – 1,8 Ф, напряжение – 1,4 кВ. Суммарная индуктивность конденсаторной батареи, кабельной линии, коллектора, и трансформатора $L_{11} = 2,25$ нГн, омическое сопротивление $R_{11} = 2$ мкОм.

В начальный момент времени ключ K_2 разомкнут. После запуска разрядников – замыкания ключа K_1 , конденсаторная батарея C_B начинает разряжаться через трансформатор на индуктивный накопитель L_{22} и взрывной плазменный размыка-

тель L_R , имеющий начальное омическое сопротивление $R_R = 25$ мкОм. На момент времени 240 мкс происходит замыкание ключа K_2 и срабатывание взрывного плазменного размыкателя L_R – омическое сопротивление ключа K_3 за время 0,5–1 мкс возрастает до 5 мОм. Ток в контуре взрывного размыкателя уменьшается, соответственно, ток индуктивного накопителя перебрасывается в цепь нагрузки L_N .

Можно сделать оценку величин токов и напряжений. Эквивалентная индуктивность контура около 13 нГн, четверть периода



а

б

Рис. 3. Внешний вид сборки со стороны размыкателя и фрагмент нагрузки для получения сверхсильных магнитных полей: а – вид со стороны взрывного размыкателя б – фрагмент нагрузки после проведения взрывного эксперимента

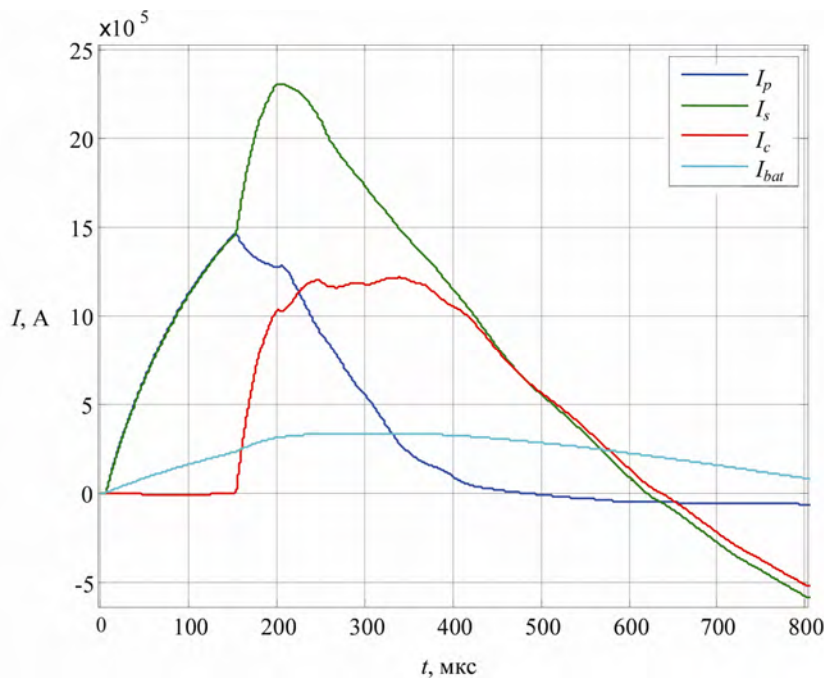


Рис. 4. Ток накопителя при коэффициенте трансформации $N = 7$: I_p – ток накопителя до подключения нагрузки; I_s – суммарный ток индуктивного накопителя; I_c – ток нагрузки после подключения, I_{bat} – ток конденсаторной батареи.

$$\tau = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} = 240 \text{ мкс, волновое сопротивление}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^{-8}}{1,8}} \approx 85 \text{ мкОм. Ток через индук-$$

тивность L_{11} (датчик D_1) $I_1 = \frac{U}{\rho} \approx 16 \text{ МА}$, из них 9 МА в индуктивном накопителе L_{22} (датчик D_2). При разрыве контура взрывным размыкателем R_R , часть магнитного потока теряется, а оставшаяся

часть перераспределяется из индуктивности 10 нГн в индуктивность 12,5 нГн, то есть остается 7 МА. С учетом неполного переброса тока, ожидаемый ток в нагрузке составляет 6 МА.

Для проверки работоспособности представленной схемы, нами были проведено несколько предварительных экспериментов. Была отработана конструкция взрывного плазменного размыкателя, позволяющая сохранять основную часть установки (рис. 3,а). После взрыва в экспериментах разрушался только фланец размыкателя и нагрузка (рис. 3,б).

На первом этапе мы провели ряд экспериментов по отработке запитки индуктивного накопителя при работе на 1/3 от максимальной энергии конденсаторной батареи и коэффициенте трансформации 7. Была, также увеличена индуктивность накопителя до 50 нГн. В накопителе с диаметром центрального электрода 50 мм получен ток 2,3 МА (рис. 4).

В последующих экспериментах планируется увеличить диаметр центрального электрода до 150 мм, уменьшить индуктивность накопителя в 5 раз и увеличить энергию конденсаторной батареи в 3 раза, доведя ее до 1,8 МДж. Все эти меры позволят увеличить ток накопителя как минимум в четыре раза и довести его до расчетной величины 9 МА.

Для сокращения длительности токового импульса передаваемого в нагрузку используется взрывной плазменный размыкатель диаметром 150 мм, длиной 12 мм. Взрывной плазменный размыкатель обеспечивает разрыв токового контура при удельной мощности $3 \cdot 10^9$ Вт/м² или мощность $1,6 \cdot 10^{11}$ Вт. При индуктивности размыкателя 2,5 нГн и токе 9 МА поглощается 100 кДж электрической энергии, что соответствует времени

разрыва $\tau_R = \frac{W}{P} = \frac{10^5}{1,6 \cdot 10^{11}} \approx 0,6$ мкс. Напряжение

на разрыве $U_R = \frac{\Phi}{\tau} = \frac{2,25 \cdot 10^{-2}}{0,6 \cdot 10^{-6}} \approx 40$ кВ.

В качестве нагрузки может быть использована коаксиальная сборка аналогичная работе [3]. Для

наружной части коаксиала из четырех пластин, каждая из которых имеет ширину 5 мм и толщину 0,1 мм при токе через пластину 2 МА, имеем плотность тока $4 \cdot 10^{11}$ А/м², интеграл тока $3,2 \cdot 10^{16}$ А²·с/м⁴, то есть ударник остается в твердом состоянии и на него действует давление магнитного поля амплитудой 10^{11} Па.

Заключение

Разработана конструкция взрывомагнитного трансформаторного стенда для получения токов амплитудой до 9 МА при питании от стационарной конденсаторной батареи с энергозапасом 1,8 МДж. Разработана и испытана конструкция взрывного плазменного размыкателя в составе трансформаторного стенда. Проведены предварительные эксперименты по отработке отдельных элементов и стенда в целом. Стенд испытан при работе от 1/3 энергетики батареи с накопителем индуктивностью 50 нГн при токе 2,3 МА. Проведены результаты оценочных расчетов при работе с полной энергетикой и индуктивностью накопителя 10 нГн. Показано, что при разрыве токового контура взрывным плазменным размыкателем с длиной канала 12 мм ожидаемая длительность импульса тока в индуктивной нагрузке 2,5 нГн составит 0,6 мкс, амплитуда тока – 6 МА, напряжение – 40 кВ.

Список литературы

1. Павловский А. И., Долотенко М. И., Колокольчиков Н. П. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 38. № 9. С. 437–479.
2. Keith Matzen M., Sweeney M. A., Adams R. G. et al. Pulsed-power-driven high energy density physics and inertial confinement fusion research. PHYSICS OF PLASMAS 12, 055503 (2005).
3. Lemke R. W., Knudson M. D., Hall C. A. et al. Characterization of magnetically accelerated flyer plates. PHYSICS OF PLASMAS, Vol. 10, No. 4, 2003.