

УДК 621.317.31

А. П. КИСЛИЦЫН, А. А. ТАРАН, Д. А. ОРАНСКАЯ, В. А. ЛЕСНОЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРИМЕНИМОСТЬ СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ДИОДА ПО ОДИНОЧНОМУ ИМПУЛЬСУ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты проверки достоверности способа восстановления вольтамперных характеристик (ВАХ) вакуумного диода, основанного на измерениях одиночного импульса высокого анодного напряжения и токового отклика на него. Экспериментальная проверка, проведенная для вакуумного диода, с монокристаллическим катодом из LaB_6 (100), показала хорошее соответствие полученной ВАХ с теоретической. При использовании термокатода из прессованного композиционного материала на основе $Ba_{0,25}Sr_{0,75}HfO_3$ зарегистрирован аномальный эффект Шоттки и показано возможное искажение ВАХ, получаемой традиционным способом. Экспериментальная проверка способа свидетельствует о его применимости для определения эмиссионных характеристик термокатодов при быстропротекающих процессах.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, вакуумный диод, термокатод, импульс напряжения, эмиссионный ток.

1. Введение. Обзор публикаций

Совершенствование имеющихся и разработка новых электровакуумных и газоразрядных устройств неразрывно связано с поиском новых материалов для термокатодов и их исследованием [1]. Проводимый комплекс исследований таких материалов предполагает контроль влияния различных факторов на их эмиссионные характеристики, на основании чего выявляется степень влияния этих различных факторов, определяются допустимые условия работы катодов, прогнозируется работоспособность устройств [2 - 3].

Первичной информацией при определении эмиссионных свойств материалов является зависимость эмиссионного тока катода $I_{эм}$ от величины анодного напряжения U_a , а именно $I_{эм} = f(U_a)$; вольтамперные характеристики (ВАХ). К достоверности этой информации предъявляются высокие требования. Например, довольно часто при исследованиях материалов в вакуумном диоде с ростом напряжения возникают электрические разряды (дуги), которые искажают ВАХ диода. Для интерпретации таких ВАХ в [4] предлагается использовать в случае статических ВАХ моделирование с применением моделей Фишера, Стоукса и Олленландера.

Существующие стандарты измерений эмиссионных свойств термокатодов вакуумных устройств установлены достаточно давно и предполагают использование для измерений прямоугольных импульсов высокого напряжения с рекомендованной длительностью ~ 5 мкс. Данное ограничение по дли-

тельности импульса создает принципиальные сложности при исследованиях свойств материалов термоэммиттеров в случаях, когда имеют место быстропротекающие процессы, такие как перегрев эмитирующей поверхности при импульсном отборе токов большой плотности [5], взаимодействие поверхности с отравляющими газами, попадающими в прикатодное пространство устройств.

В [6] был предложен способ определения эмиссионных характеристик термокатодов по результатам измерения временных зависимостей одиночных импульсов высокого напряжения и токового отклика на него в лабораторном вакуумном диоде. Результаты измерений, проведенных с использованием данного способа, показали его работоспособность.

Однако использование этого способа в качестве инструмента для исследований эмиссионных свойств материалов термокатодов требует его тщательной проверки, в частности, проверки достоверности получения вида зависимости $I_{эм} = f(U_a)$ при использовании хорошо известных и новых термоэмиссионных материалов.

2. Цель исследований

Целью данной работы является проверка применимости результатов восстановления зависимости $I_{эм} = f(U_a)$, полученной в экспериментальном диоде на основании измерений одиночного импульса высокого напряжения и токового отклика на него, к анализу состояния эмитирующей поверхности термокатодов.

3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальная проверка применимости способа восстановления зависимости $I_{эм} = f(U_a)$ по фронту одиночного импульса высокого напряжения была проведена в вакуумном диоде с плоской геометрией электродов. Исходный зазор между катодом и анодом составлял 1,0 мм. В качестве катода использовался хорошо известный эмиссионный материал – монокристалл LaB₆ (100). Измерения производились с использованием генератора прямоугольных импульсов и измерительного сопротивления $R_{изм} = 10,2$ Ом, при температуре эмитирующей поверхности 1700 К. Осциллограммы потенциала катода φ_k (импульс напряжения) и потенциала анода φ_a (отклик диода) представлены на рис. 1.

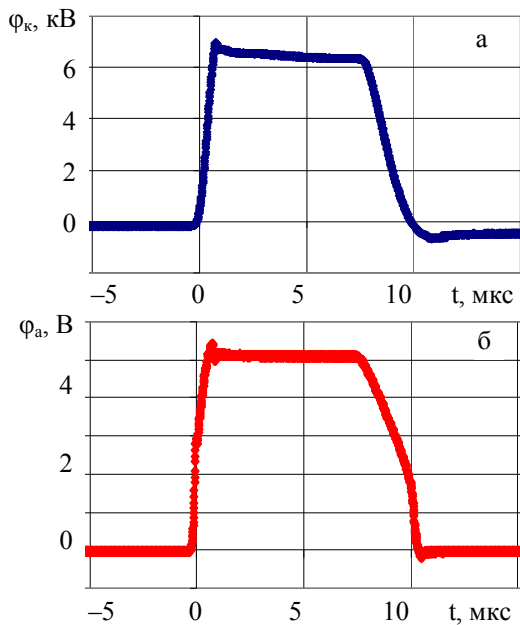


Рис. 1. Осциллограммы потенциала катода (а) и потенциала анода (б) при подаче одиночного импульса высокого напряжения

Эти осциллограммы, соответствуют требованиям, предъявляемым ГОСТом к форме прямоугольных импульсов, используемых для измерений.

Решетчатые функции $\varphi_a(t)$ и $\varphi_k(t)$ ($t = nT$, где n – порядковый номер элемента выборки; T – период дискретности), получаемые при помощи цифровых приборов, допускают простое исключение параметра t из исходных данных и формирование табличной зависимости $I_a = f(\varphi_k)$, где $I_a = \varphi_a/R_{изм}$. Такая процедура восстанавливает ВАХ диода, которая определяется не только связью $I_{эм} = f(U_a)$, но и индуктивностью и емкостью анодной цепи ($I_{эм}$ – ток эмиссии катода). Такая динамическая ВАХ неприемлема для анализа эмиссионных свойств поверхности ка-

тода. Обработка исходной информации с учетом индуктивности и емкости анодной цепи согласно [6] приводит к получению зависимости $I_a = f(U_a)$, в которой анодный ток определяется эмиссионным током катода ($I_a = I_{эм}$), что позволяет использовать ее для анализа эмиссионных свойств катода. Сопоставление динамической ВАХ и зависимости $I_a = f(U_a)$ представлено на рис. 2.

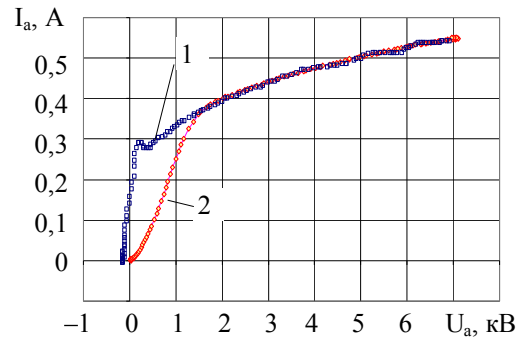


Рис. 2. Динамическая ВАХ лабораторного диода (1) и восстановленная зависимость $I_a = I_{эм} = f(U_a)$ (2) (катод LaB₆ (100))

Из сопоставления линий видно, что динамическая ВАХ существенно отличается от зависимости $I_a = f(U_a)$, особенно при относительно низких анодных напряжениях (до 2 кВ). Сама зависимость $I_a = f(U_a)$ соответствует виду классической ВАХ вакуумного диода, измеряемой в квазистатическом режиме, и может быть использована для анализа эмиссионных свойств катода.

Для более детальной проверки соответствия полученной зависимости $I_a = f(U_a)$ виду классической ВАХ, представим ее в двойном логарифмическом масштабе: при этом точки, соответствующие участку пространственного заряда электронов у поверхности катода, должны лечь на прямую с угловым коэффициентом 3/2. Как видно на рис. 3 экспериментальные точки в диапазоне значений $\ln(U_a)$ от $-2,3$ до 0 ($U_a = 0,1 \dots 1$ кВ) ложатся на прямую линию с угловым коэффициентом 3/2. Последнее свидетельствует о наличии явно выраженного участка пространственного заряда. При величинах анодного напряжения, меньших 100 В, отклонения от линейной (теоретической) зависимости, скорее всего, обусловлены квантованностью сигнала, преобразованного аналого-цифровым преобразователем.

В том случае, если экспериментальные данные представить в виде зависимости $\ln(I_a)$ от $U_a^{1/2}$, то участок тока насыщения ВАХ при наличии только нормального эффекта Шоттки будет отображаться прямой линией с угловым коэффициентом $e^{3/2} (4\pi\epsilon_0 \cdot d)^{-1/2} (kT)^{-1}$, где e – элементарный заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная, d – величина межэ-

лектродного зазора, k - постоянная Больцмана, T - температура эмитирующей поверхности. Для анализируемой ситуации ($d = 1,0$ мм и $T = 1700$ К) этот коэффициент равен 0,259, если U_a выражено в кВ. При наличии аномального эффекта Шоттки экспериментальные точки не лягут на эту прямую.

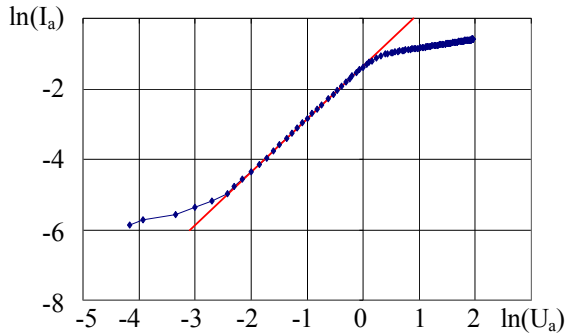


Рис. 3. Участок пространственного заряда (прямая имеет угловой коэффициент 3/2)

Результат, полученный проверяемым способом [6] и приведенный на рис. 4, свидетельствует об отсутствии аномальных искажений классического вида ВАХ вакуумного диода и может служить еще одним подтверждением применимости способа для исследования эмиссионных свойств материалов.

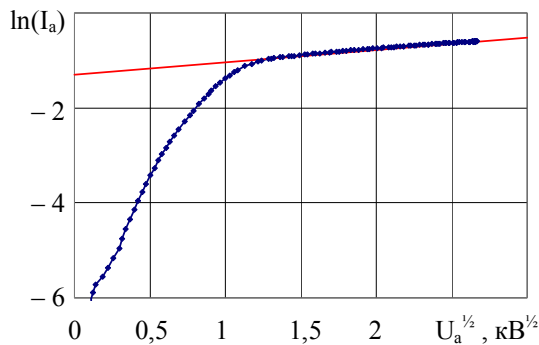


Рис. 4. Участок тока насыщения (катод - монокристалл LaB_6 (100))

Хорошее совпадение вида ВАХ, восстановленных проверяемым способом, с видом классических ВАХ стимулировало проверку применения этого способа для контроля эмиссионных характеристик прессованных композиционных материалов, для которых наблюдаются существенные аномалии в области насыщения (аномальный эффект Шоттки).

Для исследований был взят композиционный прессованный катод, изготовленный из материала $Ba_{0,25}Sr_{0,75}HfO_3$ с 22 мас.% W. Эмитирующая поверхность таких катодов оказывается рельефной и неоднородной по работе выхода электрона, что приводит к существенным аномалиям в экспериментальных зависимостях $I_a = f(U_a)$ для области токов насыщения. На рис. 5 приведены эксперименталь-

ные зависимости, полученные в диоде с катодом из композиционного материала.

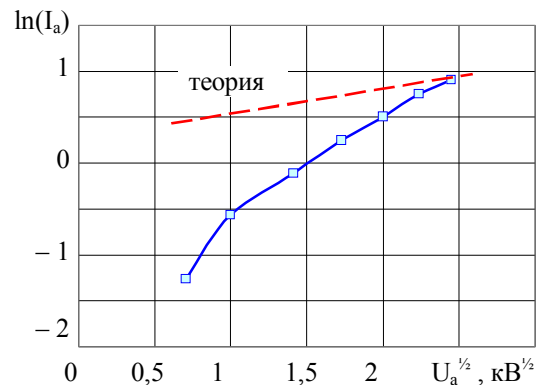


Рис. 5. ВАХ лабораторного диода с катодом из композиционного материала $Ba_{0,25}Sr_{0,75}HfO_3$ с 22 мас.% W, полученные традиционным способом при $T = 1500$ К

Точки ВАХ, приведенные на рисунке, определялись в соответствии с требованиями стандарта для импульсных измерений и определялись при частоте посылок импульсов 100 Гц с длительностью импульсов 6 мкс для установившихся значений амплитуды токового импульса (отклика) и неизменной амплитуде анодного импульса. Температура эмитирующей поверхности определялась в процессе измерений при помощи оптического пирометра ЛОП-72. Сопоставление ВАХ, представленных на рис. 4 и 5, демонстрирует наличие аномалий в области токов насыщения для диода, оснащенного композиционным катодом.

Наряду с традиционными измерениями, были проведены измерения отдельных импульсов при различных значениях амплитуды анодного напряжения и для них было осуществлено восстановление зависимостей $I_a = f(U_a)$, приведенных на рис. 6.

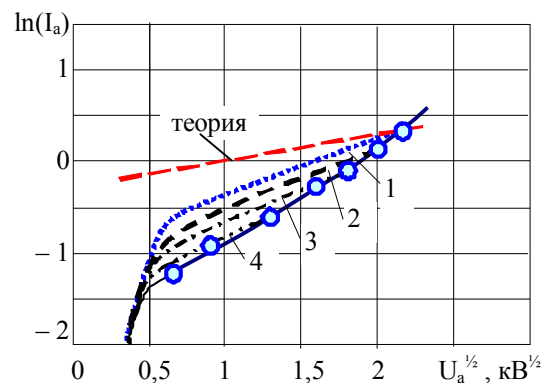


Рис. 6. ВАХ, восстановленные по фронтам импульсов для различных значений амплитуд U_a катод- $Ba_{0,25}Sr_{0,75}HfO_3$ с 22 мас.% W; амплитуда U_a , кВ: 1 - 4,73; 2 - 4,0; 3 - 2,54; 4 - 1,70

Результаты восстановления (см. рис. 6) свидетельствуют о наличии аномального эффекта Шоттки, присущего эмиссионно-неоднородным поверхностям термокатодов. Кроме того, восстановленные для разных значений амплитуды импульса анодного напряжения зависимости $I_a = f(U_a)$ не ложатся одна на другую: зависимости полученные при более высоких значениях амплитуды лежат выше. Это обстоятельство может быть объяснено дополнительным разогревом катода током, проходящим через него и отбираемым с поверхности, возрастающим при увеличении амплитуды анодного напряжения [5].

Дополнительно следует отметить, что крайние точки (при $U_a = U_{a \max}$) восстановленных зависимостей формируют точки ВАХ, определяемых традиционным способом (точки на рис. 6). С учетом того, что контролируемая температура эмитирующей поверхности считается постоянной, получаемые традиционным способом ВАХ будут иметь существенную аномалию, которая не дает возможности получить информацию, необходимую для достоверного определения эмиссионных характеристик катода.

Полученный результат экспериментальной проверки свидетельствует о том, что способ восстановления ВАХ вакуумного диода по фронтам импульсов высокого напряжения и токового отклика на него позволяет получить более детальную информацию об эмиссионных свойствах катода даже в случае быстропротекающих процессов на эмитирующей поверхности. Для обеспечения достоверности получаемых эмиссионных характеристик этот способ должен применяться с непосредственным контролем температуры эмитирующей поверхности в течение высоковольтного импульса напряжения, что можно обеспечить быстродействующим электронным пирометром.

Выводы

Способ восстановления зависимостей $I_{эм} = f(U_a)$ по фронтам импульса анодного напряжения и токового отклика на него дает достоверную информацию об эмиссионных свойствах катода, что подтверждается совпадением теоретических зависимостей и результатов обработки экспериментальных данных для монокристаллического катода из LaB₆ (100).

Восстановленные зависимости $I_{эм} = f(U_a)$ дают информацию о состоянии эмитирующей поверхности, которое она имеет в течение короткого промежутка времени, соответствующего продолжительности фронта импульса напряжения. Это обстоятельство позволяет использовать способ для изучения быстропротекающих процессов в электронных устройствах, в частности, процессов термохимического

взаимодействия отравляющих газов с поверхностью термоэмиттера, влияния ионной бомбардировки на эмитирующую поверхность и других процессов.

Литература

1. Review of LaB₆, Re-W Dispenser, and BaHfO₃-W Cathode Development [Text] / A. Taran, D. Voronovich, S. Plankovskyy et al. // *IEEE Transaction on Electron Devices*. – 2009. – Vol. 56, no. 5. – P. 812 - 817.

2. Ашкенази, Л. А. *Материалы электронных эмиттеров [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л. А. Ашкенази / Моск. гос. ин-т электроники и математики (Технический университет)*. – 2007. – Режим доступа: http://lit.lib.ru/editors/a/ashkinazi_l_a/text_0050.shtml. - 09.06.2016.

3. Светцов, В. И. *Физическая электроника и электронные приборы [Текст] : учеб. пособие / В. И. Светцов, И. В. Холодков. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2008. – 494 с.*

4. Ammerman, R. F. *Modeling High-Current Electrical Arcs: A Volt-Ampere Characteristic Perspective for AC and DC Systems [Text] / R. F. Ammerman, P. K. Sen // Proc. 39th North Amer. Power Symp. (NAPS 2007)*. – Las Cruces, New Mexico, 2007. – P. 58 – 62.

5. Кислицын, А. П. *Распределение температуры в активном слое оксидного катода при непрерывном и импульсном токоотборах [Текст] / А. П. Кислицын, С. Ю. Подгорский, А. А. Таран // Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 3 (90). – С. 47 – 55.

6. Кислицын, А. П. *Восстановление зависимости эмиссионного тока от анодного напряжения по одиночному импульсу высокого напряжения / А. П. Кислицын, А. А. Таран // Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2015. – № 2 (72). – С. 5 – 10.

References

1. Taran, A., Voronovich, D., Plankovskyy, S. et al. Review of LaB₆, Re-W Dispenser, and BaHfO₃-W Cathode Development. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 812 - 817.

2. Ashkinazi, L. A. *Materialy jelektronnyh jemitтеров : ucheb. posobie* [Materials electron emitters: Proc. benefit]. Moscow, Mosk. gos. in-t jelektroniki i matematiki (Tehnicheskij universitet). Available at: http://lit.lib.ru/editors/a/ashkinazi_l_a/text_0050.shtml (accessed 09.06.2016).

3. Svetcov, V. I., Holodkov, I. V. *Fizicheskaja jelektronika i jelektronnye pribory : ucheb. posobie* [Physical Electronics and Electronic Devices : Proc. benefit]. Ivanovo, Ivan. gos. him.-tehnol. un-t Publ., 2008. 494 p.

4. Ammerman, R. F., Sen, P. K. Modeling High-Current Electrical Arcs: A Volt-Ampere Characteristic Perspective for AC and DC Systems. *Proc. 39th North*

Amer. Power Symp. (NAPS 2007), Las Cruces, New Mexico, 2007, pp. 58 – 62.

5. Kislicyn, A. P., Podgorskij, S. Ju., Taran, A. A. Raspređenje temperatury v aktivnom sloe oksidnogo katoda pri nepreryvnom i impul'snom tokootborah [The temperature distribution in the active layer of the oxide cathode in the continuous and pulsed tokootborah] *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2012, no. 3 (90), pp. 47 – 55.

6. Kislicyn, A. P., Taran, A. A. Vosstanovlenie zavisimosti jemissionnogo toka ot anodnogo naprjazhenija po odinochnomu impul'su vysokogo naprjazhenija [Restoring dependence of the emission current from the anode voltage on the single pulse of high voltage] *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2015, no. 2 (72), pp. 5 – 10.

Поступила в редакцію 11.11.2016, рассмотрена на редколлегии 9.12.2016

ПРИЙНЯТНІСТЬ СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ДІОДА ЗА ОКРЕМИМ ІМПУЛЬСОМ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

О. П. Кислицын, А. О. Таран, Д. А. Оранська, В. О. Лесной

Наведено результати перевірки достовірності способу відновлення вольт-амперних характеристик (ВАХ) вакуумного діода на основі вимірювань окремого імпульсу високої анодної напруги і струмового відгуку на нього. Експериментальна перевірка, що проведена для вакуумного діода з монокристалічним катодом із LaB_6 (100), показала добру відповідність одержаної ВАХ теоретичній. При використанні термокатада із пресованого композиційного матеріалу на основі $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{HfO}_3$ зареєстровано аномальний ефект Шоттки та показано можливе спотворення ВАХ, що одержується традиційним способом. Експериментальна перевірка способу свідчить про його придатність для визначення емісійних характеристик термокатодів при швидкоплинних процесах.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, вакуумний діод, термокатод, імпульс напруги, емісійний струм.

RECOVERDI METOD APPLICABILITI OF VACCUM DIODE VOLT-AMPER CHARACTERISTICS BASED ON A SINGLE HIGH-VOLTAGE PULSE

O. P. Kyslytsyn, A. O. Taran, D. A. Oranska, V. O. Lesnoy

Results verification of recovery method of vacuum diode volt-ampere characteristics (VAC), based on a single high voltage pulse and current response, are presented. Experimental verification was done vacuum diode with single crystal LaB_6 (100), and there was a good correspondence between the received VAC of a vacuum diode and the theoretical one. Under using a thermionic cathode of pressed composition material $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{HfO}_3$ abnormal Schottky effect was recorded and a possible distortion of VAC received by traditional methods is shown. Experimental verification of the method confirms its applicability also for thermionic cathode characteristic determination under fact processes.

Key words: volt-ampere characteristic, vacuum diode, thermionic cathode, voltage pulse, emission current.

Кислицын Александр Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru

Таран Анатолий Алексеевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: anatoliytaran49@gmail.com.

Оранская Дарья Анатольевна – ассистент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Лесной Виктор Александрович – аспирант каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Kyslytsyn Oleksander – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru.

Taran Anatoliy – Dr. Sc. Sciences, prof., head Dep. Physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: anatoliytaran49@gmail.com.

Oranska Darija – assistant of Dept. of physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.

Lesnoy Viktor – aspirant of Dept. of physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.