

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.663

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА PAS

©2026 г. А. Г. Крившич ^{a*}, В. А. Андреев ^a, М. И. Гасанов ^b,
Д. М. Гасанов ^b, В. Ю. Иванов ^a, Е. А. Иванов ^a, М. М. Иванова ^a,
Д. С. Ильин ^a, Д. А. Майсузенко ^a, И. Н. Парченко ^a, А. А. Фетисов ^a,
Н. Н. Филимонова ^a, Г. Д. Шабанов ^a

^a Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, 1

^b ООО “МедСпецТруб”

Россия, 195027, Санкт-Петербург, Магнитогорская ул., 23

*E-mail: krivshich_ag@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 02.02.2026

После доработки 18.05.2026

Принята к публикации 27.07.2026

В рамках создания протонного спектрометра PAS для эксперимента R3В (ФАИР, Германия) была разработана технология изготовления трубок из алюминиевого сплава АМГ-5 с очень малой толщиной стенки (0.22–0.24) мм. Все трубки прошли выходной контроль на фирме-производителе и входной контроль в отделе трековых детекторов ОФВЭ ПИЯФ, где из них были изготовлены дрейфовые трубки. Последние прошли испытания на герметичность в вакууме. На базе этих дрейфовых трубок были собраны и испытаны два прототипа для детекторных плоскостей спектрометра: прототип №1 (детекторные плоскости Y_1 , длина 1000 мм) и прототип №2 (детекторные плоскости X_2 и Y_2 , длина 2500 мм). Представлены результаты испытания данных прототипов путем тестирования их работы с радиоактивными источниками ^{90}Sr и ^{55}Fe . Детально описаны измерения рабочих характеристик прототипа №2 как более сложного в плане конструкции. Измерены токовые и счетные характеристики дрейфовых трубок, а также величина коэффициента газового усиления в дрейфовых трубках при разном давлении газовой смеси. Дано заключение о диаметре анода и о пригодности разработанной технологии к созданию спектрометра PAS.

Ключевые слова: дрейфовые трубки, длина трубки, ток и счет трубки, давление, коэффициент газового усиления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений современных исследований в физике атомного ядра является изучение экзотических ядер. Уникальные возможности для таких исследований

появятся на новом ускорительном комплексе ФАИР, создаваемом в Германии, который будет производить вторичные высокоинтенсивные пучки радиоактивных ядер с энергией до 1.5 ГэВ/нуклон. В частности, для изучения широкого спектра ядерных процессов, таких как упругое и неупругое рассеяние, квазиупругое рассеяние, электромагнитное возбуждение, зарядообменные реакции и др., планируется эксперимент R3B.

Отдел трековых детекторов ОФВЭ ПИЯФ отвечает за создание протонного спектрометра PAS, который войдет в состав экспериментальной установки R3B [1, 2]. Конструктивно спектрометр будет состоять из четырех детекторных плоскостей X_1 , Y_1 , X_2 , Y_2 . PAS должен содержать минимальное количество вещества, но при этом еще и работать в условиях вакуума. Чтобы соблюсти эти условия, было решено изготавливать три последние детекторные плоскости на базе дрейфовых трубок (ДТ) с ультратонкими стенками из алюминиевого сплава, которые будут работать в вакууме, а значит, под избыточным давлением. Технология изготовления алюминиевых ультратонких длинных трубок, из которых в отделе трековых детекторов изготавливались ДТ, подробно описаны в [3].

На первом этапе был разработан и изготовлен прототип №1 для детекторной плоскости Y_1 (рис.1). Он был собран из 96 алюминиевых дрейфовых трубок с толщиной стенки 220–240 мкм, диаметром 10 мм и длиной 1100 мм, склеенных в три слоя. Внутри ДТ натягивалась золоченная вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм, которая служила анодом. Прототип был оснащен считывающей электроникой на базе системы CROSS-3 (разработка ПИЯФ). Он успешно прошел испытания на углеродном пучке в Германии в институте ГСИ. Была измерена пространственная структура пучка и его гало, получены временные спектры дрейфовых трубок и отработаны алгоритмы отбора событий [4].

Рис.1. Прототип №1.

Для создания технологии изготовления и оптимизации параметров конструкции длинных ДТ, был создан прототип №2, состоящий из шестнадцати ДТ длиной 2500 мм с ультратонкими стенками. Важно, что его длина превышала максимальную длину трубки (2200мм) спектрометра из детекторных плоскостей X_2 и Y_2

Необходимо выделить спектр задач для изготовления ДТ, которые должны быть зафиксированы и детально изучены, а именно:

- следует определить рабочие точки по напряжению в диапазоне давлений 1–3 атм;
- выяснить, каковы условия применения поддержек (механических приспособлений, в точке установки которых устраняется провисание анодной проволоки) для анодов диаметром 30 и 35 мкм ;

- определить, каковы допустимая деформация дрейфовых трубок и устойчивость их работы.

Если же конструкция PAS спектрометра потребует наличие поддержек, будет необходимо дополнительно учесть следующее:

- поскольку поддержка вносит заметную неэффективность в зону анода, ее абсолютное положение и форму обязательно надо учитывать в эксперименте для каждой ДТ;
- надо учитывать, что в зоне поддержки локальный коэффициент газового усиления () падает в 3–4 раза, и, соответственно, пространственное разрешение дрейфовых трубок существенно ухудшается;
- трубки с поддержкой надо искусственно распределять в пространстве, не допуская наложения поддержек в них друг на друга.

Также поддержки вносят дополнительный материал в зоне регистрации частиц и усложняют конструкцию PAS-спектрометра.

Характеристики обоих прототипов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики созданных прототипов

Характеристика	Прототип № 1	Прототип № 2
Апертура, мм ²	1000 мм × 300	2500 мм × 50
Число каналов	96	16
Толщина стенки трубки, мкм	220–240	
Диаметр анода, мкм	30	30 и 35
Поддержка анода	Нет	Есть в четырех трубках
Давление рабочего газа, атм	1–3	
Рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$, кВ	1.0–3.5	
Темновой ток, $I_{\text{темн}}$	< 1 нА/трубку	
Испытания	⁹⁰ Sr, ⁵⁵ Fe, пучок ¹² C	⁹⁰ Sr, ⁵⁵ Fe

В результате проведенных экспериментальных работ были получены исходные данные, позволившие обосновать принципиальные рабочие параметры PAS-дрейфовых трубок и зафиксировать их в финальной технической спецификации PAS.

В программном пакете GARFIELD (плюс пакет MAGBOLTZ) была смоделирована работа PAS с различными газовыми смесями. По совокупности расчетных параметров из многих газовых смесей была выбрана смесь 70%Ar+30%C₂H₆.

2. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА № 2

Прототип №2 имел трехслойную структуру, которая схематически показана на рис.2. Он был сделан из ДТ длиной 2500 мм с анодами диаметрами 30 и 35мкм. Часть этих анодов имела поддержку, а часть – нет. Поддержка анодной проволоочки была выполнена из оргстекла и устанавливалась в центре трубки при ее сборке. Конструкция прототипа закреплялась в пространстве за четыре технологические трубки, которые располагались по краям пакета. На рис.2 они отмечены коричневым цветом. Параметры дрейфовых трубок в прототипе представлены в табл. 2.

Рис. 2. Структура прототипа № 2.

Таблица 2. Параметры дрейфовых трубок в прототипе № 2

Номера трубок	Диаметр анода, мкм	Поддержка	Натяжение анода, г
2, 3, 7, 8, 12, 13	35	Нет	140
1, 6	35	Есть	140
4, 5, 9, 10, 14, 15	30	Нет	90
11, 16	30	Есть	90

Аноды диаметром 30 мкм (эти ДТ даны серым цветом на рис. 2) и аноды диаметром 35 мкм (эти ДТ даны белым цветом на рис. 2) находятся в каждом слое. Чертеж поддержки представлен на рис. 3. Рабочие характеристики прототипа исследовались при облучении источниками гамма-квантов (^{55}Fe) и электронов (^{90}Sr).

Рис.3. Чертеж поддержки анода

Структура и размеры применяемых коллиматоров для формирования пучка для облучения показаны на рис. 4.

Рис.4. Коллиматоры для проведения исследований.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

Исследованы темновые токи и счетные характеристики при двух давлениях $P = 1$ атм и $P = 2$ атм (с рабочей газовой смесью 70%Ar+30% C_2H_6) всех шестнадцати дрейфовых трубок. Результаты измерения счетных характеристик ДТ и соответствующие рабочие напряжения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Диапазон рабочих напряжений дрейфовых трубок

Диаметр анода, мкм	Давление, атм	Начало плато, кВ	Конец плато, кВ	Ширина плато, В
30	1	1.57	2.2	650
	2	2.14	2.98	840
35	1	1.65	2.32	670
	2	2.21	3.36	1150

Из данных табл. 3 видно, что для анода диаметром 35 мкм ширина плато эффективности ДТ составляет 670 В (при $P=1$ атм), а увеличение давления до $P=2$ атм, приводит к почти двукратному уширению плато – до 1150 В. Понимание последнего важно для плоскости $X1$, где натяжение анода будет задаваться значительным избыточным давлением в каждой ДТ.

Измерена зависимость КГУ в дрейфовой трубке от величины высокого напряжения для двух диаметров анода 30 мкм и 35 мкм (рис.5).

Рис. 5. Зависимость заряда, создаваемого в лавине ...

Коэффициент газового усиления (газовая смесь $Ar+30\%C_2H_6$) рассчитывался как отношение Q_n/Q_p , где Q_n – заряд, собранный на аноде в результате ионизации, а Q_p – заряд первичных электронов, образующихся от поглощения γ -кванта от источника ^{55}Fe . На рис. 5б даны амплитудные спектры сигналов, полученные при различных величинах высокого напряжения для анодной проволоочки диаметром 35 мкм. Видно, что амплитудный спектр от реального сигнала (зеленый цвет) весьма хорошо описывается спектром Гаусса (красный цвет). Это показано в трех точках по напряжению: до рабочей точки ($Q=500$ фКл), непосредственно в рабочей точке ($Q=2000$ фКл), после рабочей точки ($Q=5000$ фКл). Величина усиления спектрометрического усилителя, которая вводится в схему электроники при этих напряжениях, показана на всех трех спектрах на рис. 5б.

На рис. 6а, б показаны токовый профиль трубки и его флуктуации в зависимости от напряжения. Коллиматор источника ^{90}Sr дает узкий пучок (рис. 4б), который имеет в зоне облучения однородное пятно размером $FWHM=4$ мм. Для наглядности этот пучок представлен на рис. 6а, б серой полосой. Видно, что вершина пучка плоская и ток на ней достигает 1400 нА при величине флуктуации тока 10%. За пределами геометрических размеров пучка величина тока падает более, чем в 7 раз (менее 200 нА), но там его флуктуации резко нарастают, достигая 30–40%. Характер зависимости величины относительного разброса значений тока $((I_{max}-I_{min})/I)$ от поперечной координаты объясняется ростом относительной ошибки измеряемого тока вблизи стенок ДТ, где среднее

значение тока значительно снижается относительно фона, создаваемого боковыми стенками коллиматора.

Рис. 6. Токовый профиль пучка электронов ...

Форма пучка остается практически постоянной во всем диапазоне напряжений. Детально исследовано и показано, что типовые характеристики для дрейфовых трубок, весьма обнадеживающие (рис.7):

- величина темнового тока небольшая, а его форма имеет правильную структуру. Так, при почти предельном напряжении (2300 В) его величина не превышает 45 нА, что составляет менее 0.5% от средней величины тока;
- трубки уверенно выдерживают ток от радиоактивного источника, который при 2300 В достигает высокой величины – 10 мкА;
- темновой счет невелик и в конце плато эффективности при напряжении 2300 В его величина не превышает 20 с^{-1} ;
- трубки осуществляют счет событий от радиоактивного источника, который при 2300 В достигает 800 с^{-1} . Начало плато эффективности соответствует 1700 В; оно ровное и широкое и имеет длину около 700 В;
- ширина плато при давлении 2 атм составляет почти 1350 В, а темновой счет не превышает 20 с^{-1} .
- максимальные флуктуации тока вдоль анода не превышают $\pm 4\%$.

Эффективность трубки в области поддержки измерялась узким пучком (рис.4б) и представлена на рис.8. Амплитудные спектры приведены для двух областей: за пределами поддержки и в области поддержки. Ширина области неэффективности по основанию равна 18мм и на уровне FWHM составляет 4мм.

Рис. 7. Токовые характеристики трубок ...

Рис. 8. Токовая характеристика трубок в области поддержки. ...

Сравнивая все данные, полученные для анодов диаметром 30 и 35 мкм, мы выбрали в качестве анода для PAS проволочку диаметром 35 мкм, уверенно работающую без поддержки.

Величина КГУ вдоль любой ДТ практически постоянна (рис.9) и ее максимальные отклонения не превышают $\pm 1\%$. Это означает, что все длинные дрейфовые трубки – прямые.

Рис. 9. Флуктуации КГУ вдоль анода одной из трубок ...

Токовые характеристики, полученные для анода диаметром 30 мкм (давление 1–2 атм), представлены на рис.10а, а для анода диаметром 35мкм (давление 1–3 атм) – на рис. 10б.

Рис. 10. Токовые характеристики дрейфовых трубок ...

Видно, что во втором случае ток в ДТ от радиоактивного источника может достигать 12–14 мкА. Это значительно больше, чем для анода диаметром 30 мкм. Но при давлении 3 атм (рис. 10б) ток ограничен не свойствами ДТ, а максимальным напряжением высоковольтного источника, у которого предельная величина производимого напряжения составляет 4100 В.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОГНУТЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

Отдельно изучалось влияние деформации дрейфовой трубки (имеется в виду осевой прогиб катода трубки) на ее рабочие характеристики. При этом диаметр анода равнялся 30 мкм. Измерено изменение тока при деформации дрейфовой трубки на величину 1 мм для напряжений $V=1950$ В и $V=2050$ В. Результаты, полученные для напряжения $V=2050$ В напряжения, показаны на рис.11. Измерения проводились на коллиматоре, изображенном на рис. 4б.

Рис. 11. Токовые характеристики трубок при их деформации на 1 мм ...

Показано, что чувствительность токовых характеристик к величине деформации трубки существенно зависит от абсолютной величины КГУ. Так, при изгибе трубки на 1 мм ток в центре увеличивается на 14% (от 420 до 470 нА) при $V = 1950$ В, а при $V = 2050$ В ток в центре увеличивается уже на 35% (от 710 нА до 960 нА). То есть, в 2.5 раза быстрее!

Наши исследования показали, что разница между максимальными и минимальными значениями мгновенных токов составляет 2–3% от абсолютной величины тока. Мгновенные значения тока зависят от величины деформации трубки и составляют 40 нА ($\pm 4\%$) без деформации и увеличиваются до 80 нА ($\pm 5\%$) при деформации 1мм.

Детально зависимость величины тока от величины деформации трубки при фиксированном напряжении приведена на рис.12. Сдвиг осуществлялся с помощью микрометрического винта с точностью хода ± 5 мкм, размещенного в центре трубки. Использовался коллиматор, создающий узкий пучок (рис. 4б). Видно, что деформация катода трубки до 200 мкм практически не влияет на величину КГУ.

Рис. 12. Токовые характеристики трубок при их деформации. ...

Зависимость скорости нарастания тока от напряжения представлена на рис. 13. (Измерения проводились на коллиматоре, изображенном на рис. 4б.) Видно, что скорость нарастания тока от напряжения разная. Она нарастает медленно при низком напряжении (от $V = 1650$ В до $V = 1950$ В) и существенно быстрее при более высоком напряжении (от $V = 1950$ В до $V = 2150$ В). Более того, при наличии деформации ток в трубке нарастает еще быстрее. Это утверждение было проверено и с коллиматором (рис. 4а), дающим широкий пучок, и оно также подтвердилось.

Рис. 13. Токовые характеристики трубок от напряжения ...

Измерения с деформированием ДТ проводились с целью определения возможности использования однородности тока вдоль трубки в качестве критерия оценки абсолютного положения анодов. Анализ измерений показал, что деформация трубки от 0.2 до 1.0 мм вызывает перераспределение структуры электрического поля таким образом, что приводит к его неоднородности. При относительно небольших деформациях трубки (до 200 мкм) однородность тока остается неизменной.

Это означает, что в этом случае методика контроля однородности тока по величине деформации катода трубки не может служить критерием, по которому можно контролировать абсолютное положение анодной проволоочки. Поэтому, если мы хотим регистрировать частицы с пространственной точностью 150–200 мкм, то надо обеспечивать (гарантировать) положение анода в пространстве другими методами.

Однако требования к флуктуациям пространственного положения катода дрейфовой трубки вдоль анода не столь существенны, допускаются значения до 200 мкм. Вывод о подобной допустимой деформации справедлив для анодов обоих диаметров, как 30 мкм, так и 35 мкм. Это связано с тем, что оба анода уверенно находятся в области цилиндрического электрического поля.

5. ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана технология изготовления ультратонких длинных трубок. Это позволило создать дрейфовые трубки длиной до 2500 мм, надежно работающие в широком диапазоне давлений 1–3 атм.

2. Сравнение всех полученных результатов позволяет выбрать анодную проволочку диаметром 35 мкм для всех ДТ, входящих в спектрометр PAS. В результате, анодам в ДТ вообще не требуются поддержки.

3. Величина КГУ остается практически постоянной, если пространственная (механическая) деформация катодов дрейфовых трубок составляет до 200 мкм. Это значит, что требования к пространственным флуктуациям катода в этом диапазоне не столь существенны.

4. Для регистрации частиц с абсолютной пространственной точностью лучше 150–200 мкм необходимо гарантировать точность положения анодов в пространстве другими (не токовыми) методами.

5. Определены рабочие точки по напряжению для дрейфовых трубок.

6. Работа выполнена совместно с ООО “МедСпецТруб” и ОТД ОФВЭ ПИЯФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical Report for the Design, Construction and Commissioning of the Tracking Detectors for R^3B , 2017. P. 101. <https://edms.cern.ch/document/1816116/2>
2. *Alkhazov G.D., Andreev V.A., Golovtsov V.L. et al.* Proton arm spectrometer for the R^3B set-up at fair. Сборник “Основные результаты научной деятельности ОФВЭ за 2019–2022”. https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/articles/methods_2018-2022/7.pdf
3. *Андреев В.А., Гасанов М.И., Гасанов Д.М. и др.* Создание в НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ спектрометра протонов PAS для проекта FAIR (Германия). Изготовление тонкостенных алюминиевых трубок для координатных плоскостей PAS. Москва: Курчатовский институт, 2021. https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010741504/
4. *Krivshich A.G., Alkhazov G.D., Andreev V. et al.* Preliminary results of the PAS prototype test with a 12C beam. GSI Scientific Report 2016. GSI 2017. P. 217. <https://doi.org/10.15120/GR-2017-1> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1.** Прототип №1: **а** – размещение этого прототипа на пучке атомов углерода в Германии, **б** – схема эксперимента
- Рис. 2.** Структура прототипа № 2
- Рис.3.** Чертеж поддержки анода
- Рис.4.** Коллиматоры для проведения исследований: **а** – коллиматор, создающий достаточно широкий пучок – 10 мм, конструкция дана в двух проекциях; **б** – коллиматор, создающий узкий пучок – 4мм.
- Рис. 5.** Зависимость заряда, создаваемого в лавине, от высокого напряжения для анода диаметром 30 и 35 мкм (**а**). Три амплитудных спектра, полученные при трех различных напряжениях (**б**)
- Рис. 6.** Токовый профиль пучка электронов, измеренный трубкой при различных напряжениях (**а**) и его флуктуации (**б**). Серый прямоугольник на обоих рисунках – геометрический профиль пучка.
- Рис. 7.** Токовые характеристики трубок (**а**) и счетные характеристики трубок (**б**) при различных напряжениях и давлении 1 атм
- Рис. 8.** Токовая характеристика трубок в области поддержки. Типовые амплитудные спектры в центре области поддержки и за ее пределами
- Рис. 9.** Флуктуации КГУ вдоль анода одной из трубок при давлении 2 атм и напряжении 2.6 кВ. Газовая смесь $Ar+30\%C_2H_6$.
- Рис. 10.** Токовые характеристики дрейфовых трубок при давлении в диапазоне 1–3 атм. Диаметры анода 30 мкм (**а**) и 35 мкм (**б**).
- Рис. 11.** Токовые характеристики трубок при их деформации на 1 мм и при напряжении 2050 В.
- Рис. 12.** Токовые характеристики трубок при их деформации, диаметр анода составляет 30 мкм
- Рис. 13.** Токовые характеристики трубок от напряжения, диаметр анода составляет 30 мкм

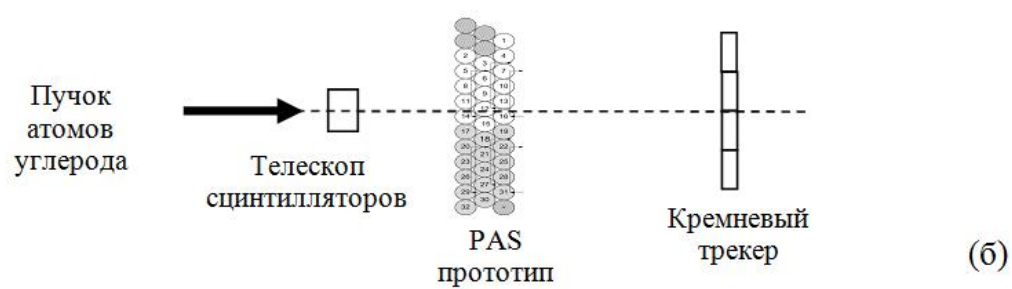
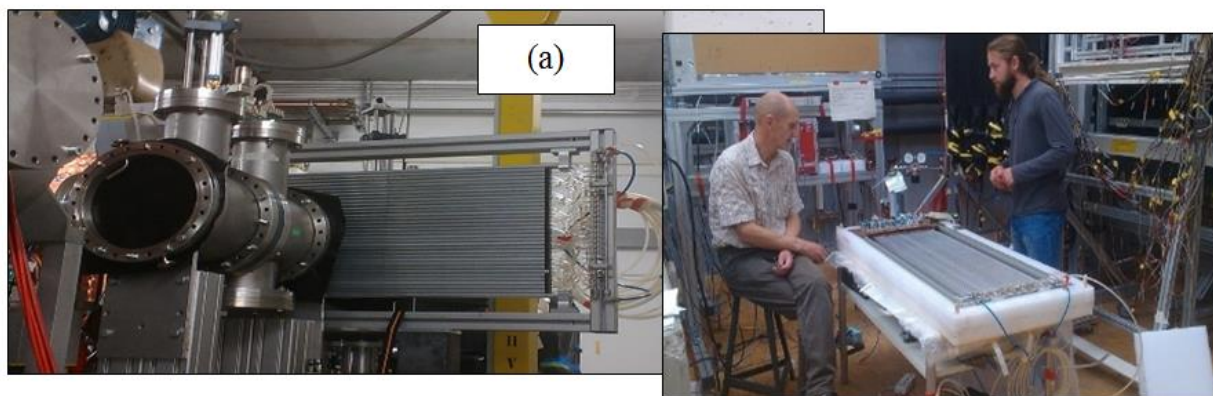


Рис.1.

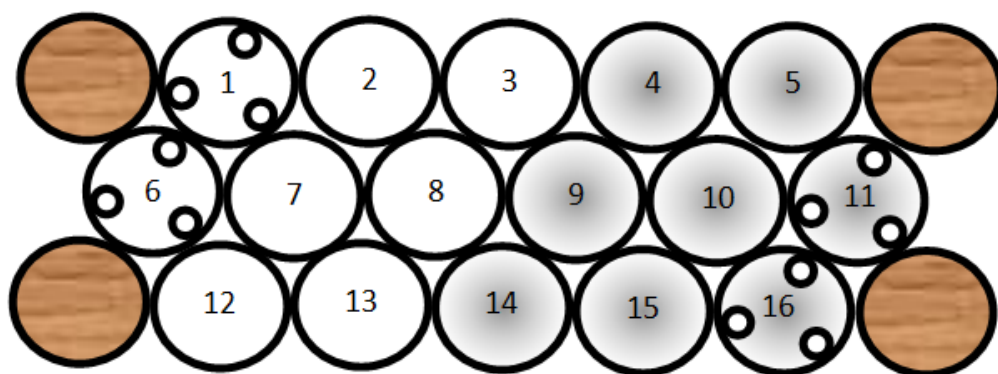


Рис. 2.

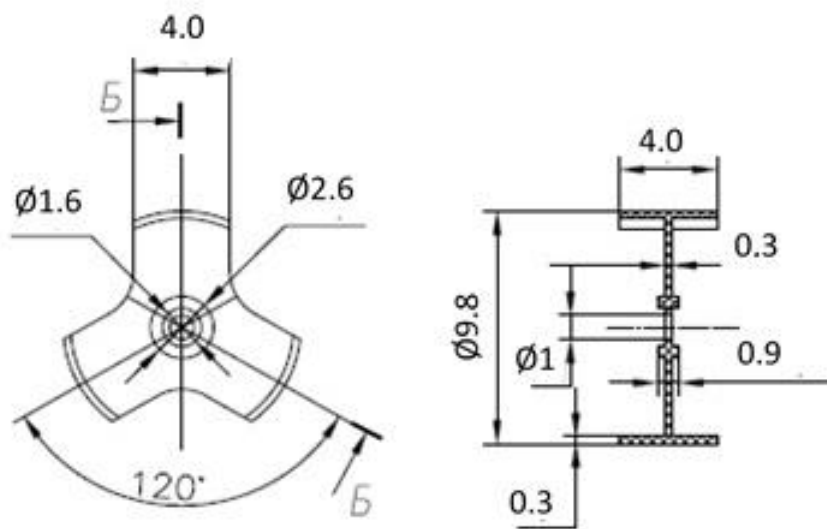


Рис. 3.

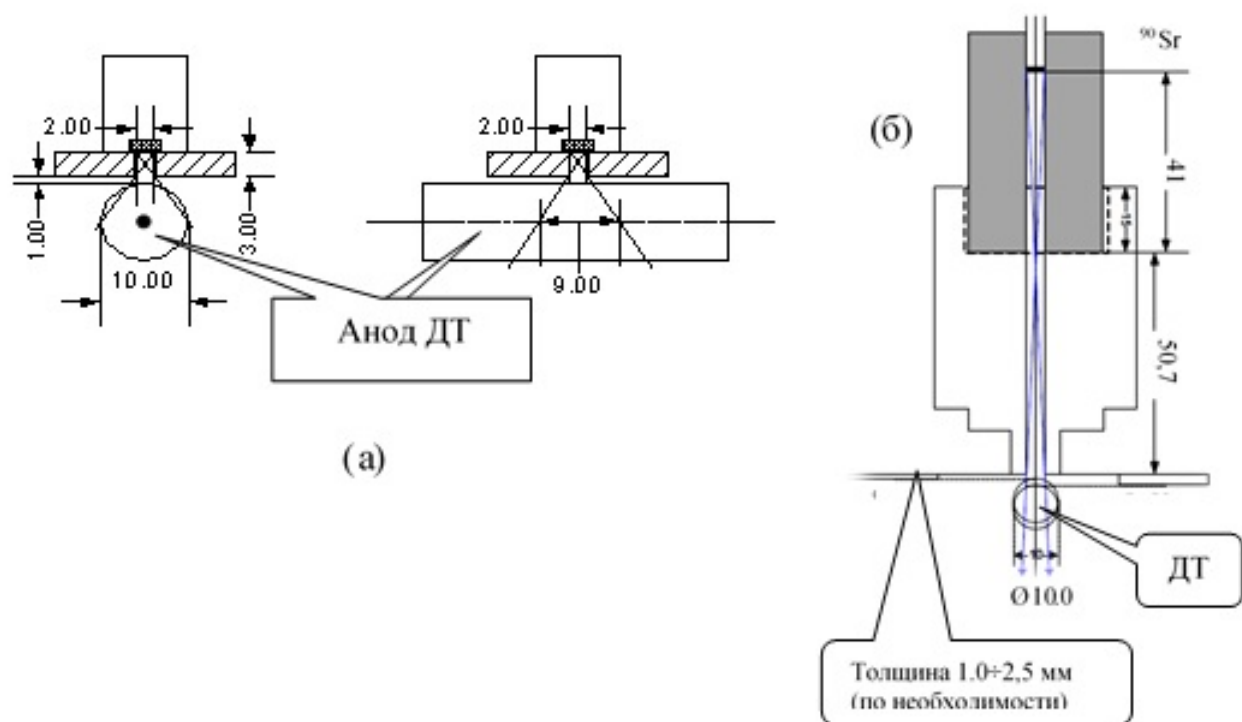


Рис. 4.

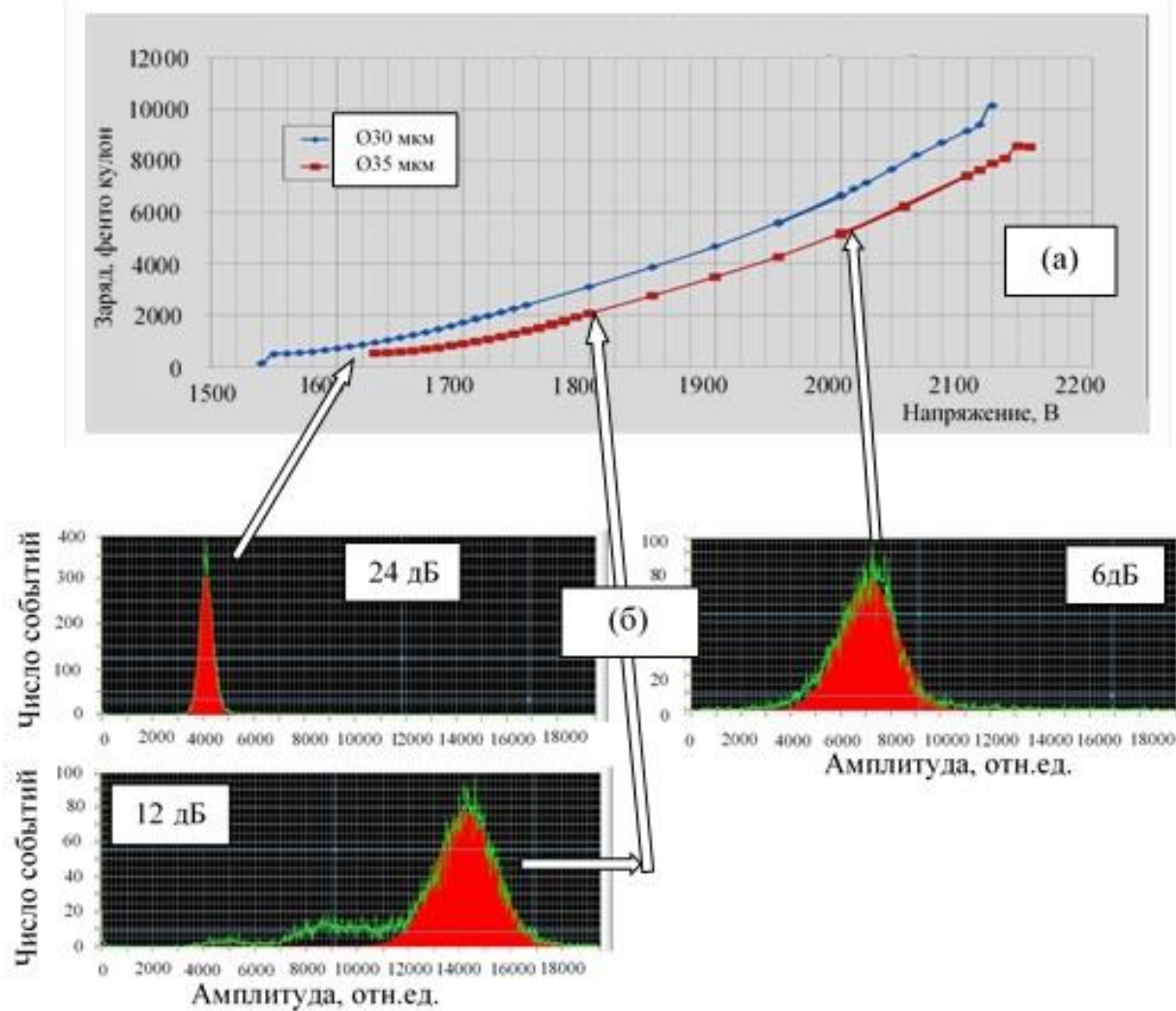


Рис. 5.

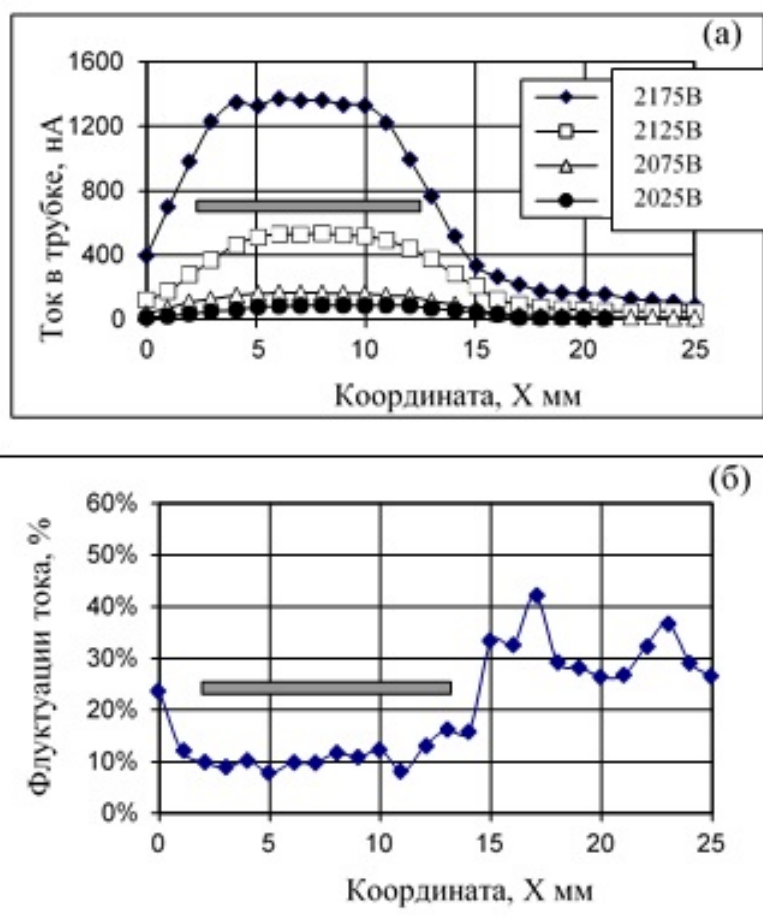


Рис. 6.

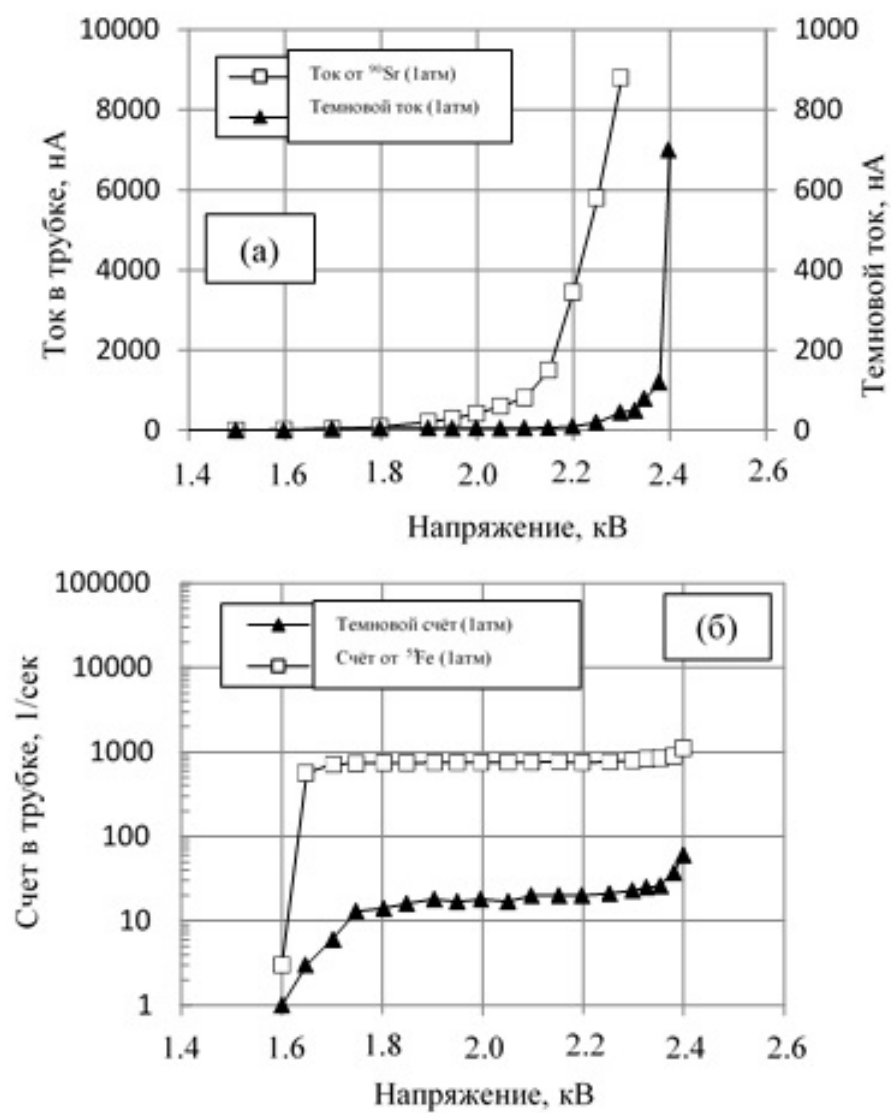


Рис. 7.

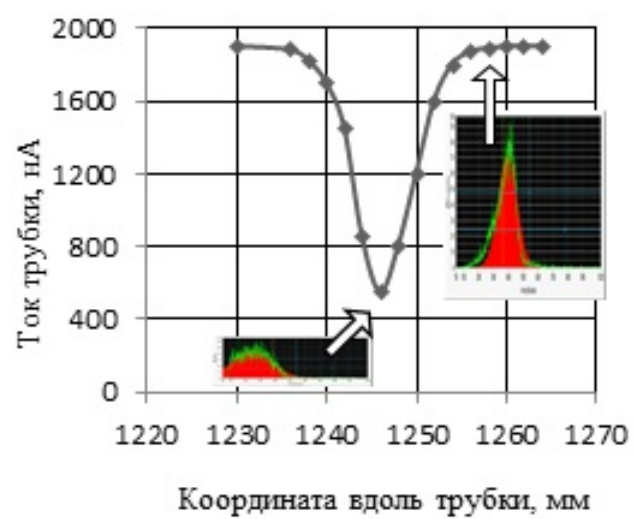


Рис.8.

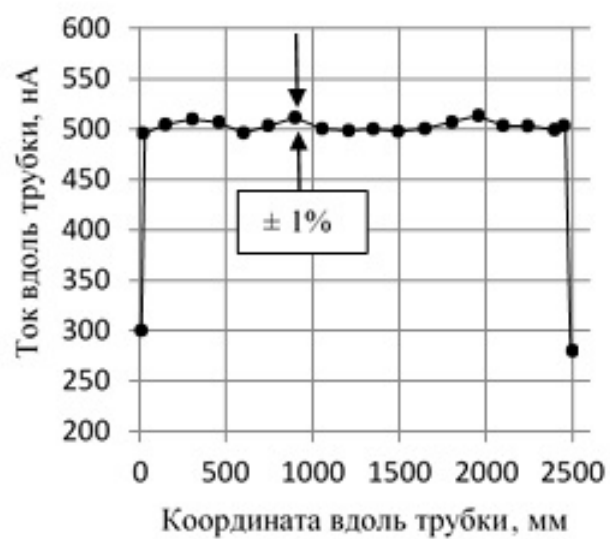


Рис.9

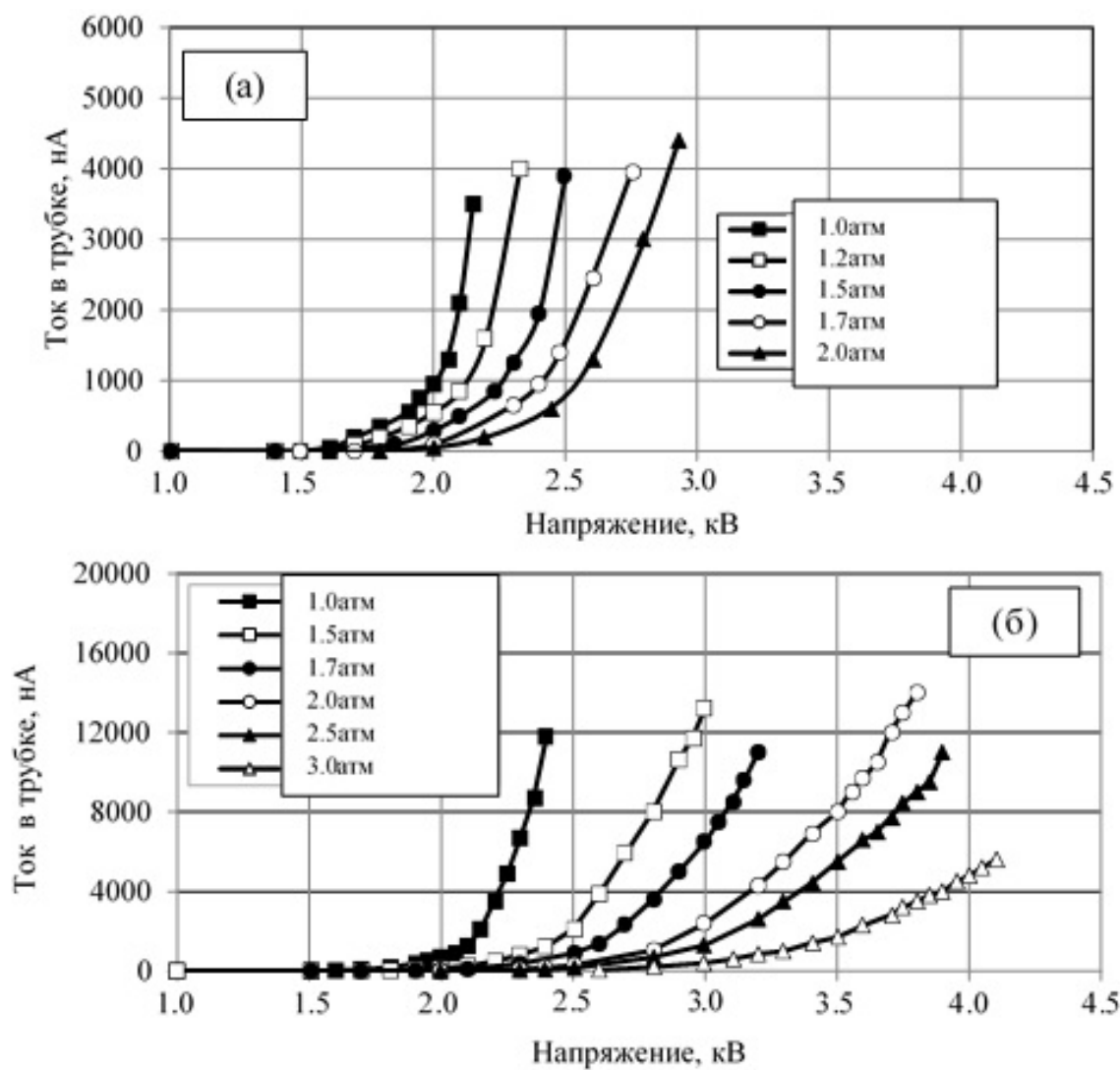


Рис. 10.

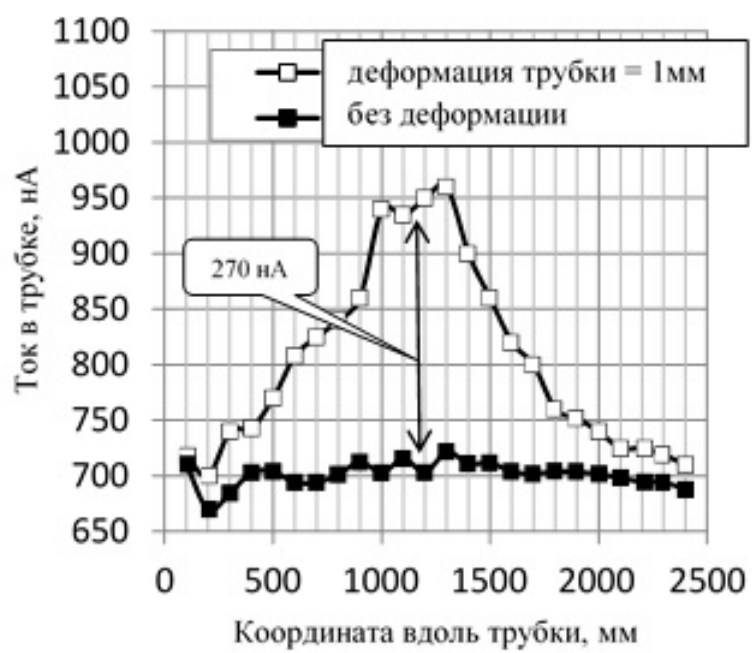


Рис. 11.

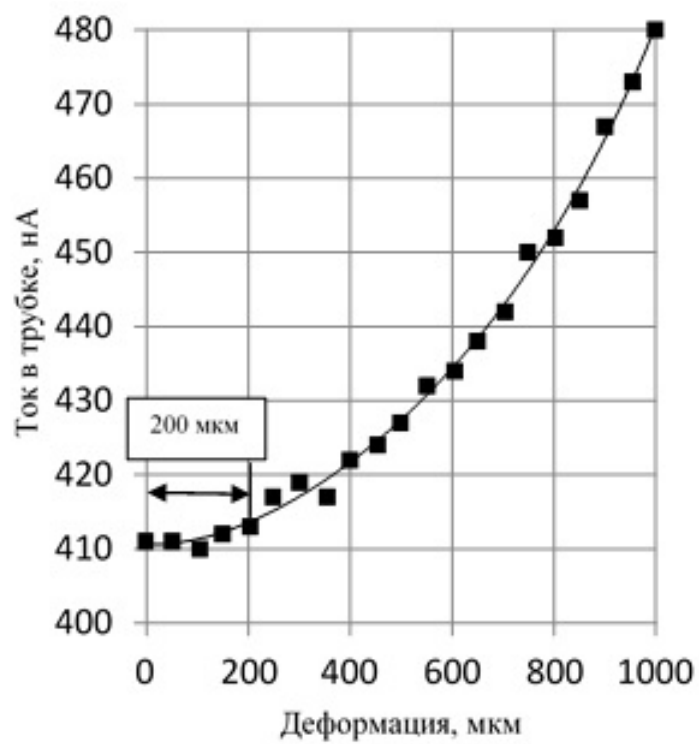


Рис. 12.

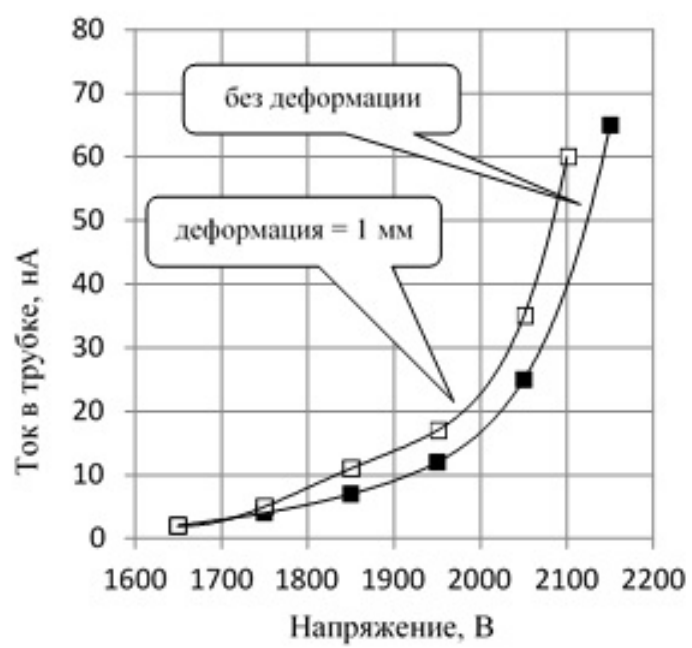


Рис.13.