

Д13-2016-82

Л. Н. Глonti, М. Мишева, Ю. К. Потребеников,
Н. О. Ридингер, В. А. Самсонов, Г. С. Седых

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АНОДНЫХ
ПРОВОЛОК В ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ
ТРУБКАХ (СТРОУ) НОВОГО ТИПА В ВИДИМОМ СВЕТЕ
ДЛЯ ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР ЭКСПЕРИМЕНТА NA62.

I. ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Глонти Л. Н. и др.

Д13-2016-82

Определение местоположения анодных проволок в тонкостенных дрейфовых трубках (строу) нового типа в видимом свете для дрейфовых камер эксперимента NA62.

I. Измерения в проходящем свете

Изучение под микроскопом тонкостенных дрейфовых трубок (строу) нового типа для дрейфовых камер эксперимента NA62 показало, что они полупрозрачны и при освещении направленным светом позволяют наблюдать в них анодные проволоки и измерять их местоположение как в проходящем, так и в отраженном свете.

В этой работе приводятся новые результаты калибровочных измерений координат анодных проволок на микроскопе УИМ-23 с точностью $\sim \pm 1-2$ мкм. Показано, что, используя микроскоп с электронным окуляром и оптическую скамью, в автоматическом режиме измерений можно получить точность $\sim \pm 0,003$ мкм. В отличие от методов с использованием радиоактивного или рентгеновского излучений, предложенный здесь способ много проще.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Glonti L. N. et al.

Д13-2016-82

Determination of the Anode Wire Position in a New Type of Thin-Wall Drift Tubes (Straws) for the NA62 Drift Chambers Using Visible Light.

I. Measurements in Transmitted Light

Microscope studies of thin-wall drift tubes (straws) of a new type for the NA62 drift chambers have shown that under certain conditions they are semitransparent and, when illuminated by directional light, allow their anode wires to be observed in both transmitted and reflected light. These tubes are supposed to be used in other experiments as well.

In this work, new results of the calibration measurements performed with an accuracy of about $\sim \pm 1-2$ μm using the UIM-23 microscope are presented. It is also shown that the measurements can in principle be automated. The first semiautomatic measurements accurate to about $\sim \pm 0.003$ μm are reported, which are made under the MBS-type microscope with a digital eyepiece. The proposed method is much simpler than the methods based on radioactive or X-ray radiation.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Пространственное разрешение треков заряженных частиц в экспериментах с дрейфовыми строу-камерами зависит от многих факторов. В первую очередь это механические точности изготовления камеры, самих трубок, наконечников и поддержек к ним. Затем важны состав и давление газовой смеси, физические процессы в дрейфовых трубках, электроника съема данных и др. Среди них важное место занимают точность расположения анодных проволок в камере и выдержка расстояний между ними (их параллельность) по всей длине.

Координаты трека любой заряженной частицы, прошедшей через плоскость дрейфовой камеры, строго привязаны к ближайшим к этому треку анодным проволокам. Вот почему контролировать их реальное местоположение в камере так важно.

В случаях, когда анодная проволока визуально недоступна для наблюдения, используют радиоактивный источник электронов или рентгеновские лучи. Устройства, основанные на применении этих методов, достаточно сложны. Для сканирования проволок необходимо синхронно перемещать источник и детектор рассеянного на проволоках излучения, расположенные на противоположных сторонах камеры (пассивный, или теневой метод). Или же в качестве детектора можно использовать сами дрейфовые трубки (активный метод; он, кстати, не применим в процессе производства камер). В обоих случаях местоположение анодных проволок определяется по центрам распределения рассеянного на них излучения. Это довольно длительная и трудоемкая процедура (см., например, [1–3]).

Дрейфовые трубки, предназначенные для работы в вакууме и использованные в дрейфовых камерах эксперимента NA62 (всего 7200 трубок диаметром 9,80 мм и длиной 2300 мм) [4, 5], оказались полупрозрачными с коэффициентом прозрачности $\sim 2\%$. При их просвечивании направленным лучом видимого света в микроскопе можно хорошо наблюдать анодные проволоки. Следовательно, при перемещении камеры или микроскопа можно точно измерить их местоположение. Выявление этого факта позволило нам разработать относительно простой способ измерения координат анодных проволок в дрейфовых камерах с такими трубками (см. [6, 7]). В работе [6] было показано, что с помощью микроскопа можно непосредственно определять местоположение проволок $\varnothing 30$ мкм с точностью примерно 5 мкм. Проволоки обнаруживаются как в проходящем, так и в отраженном от них свете. Для

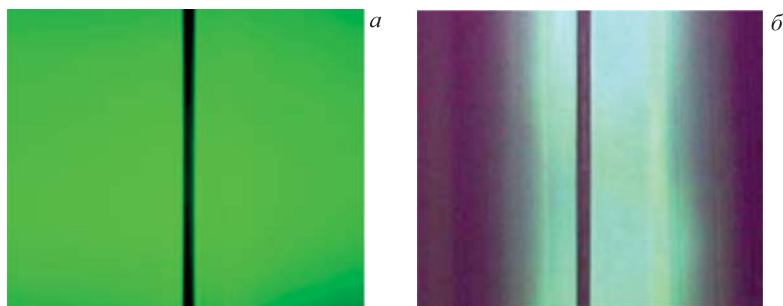


Рис. 1. Изображение анодной проволоки $\phi 30$ мкм в 9,80-мм полупрозрачной трубке: *a*) в проходящем свете; *б*) в отраженном свете

примера на рис. 1 показано изображение такой анодной проволоки внутри дрейфовой трубки в проходящем свете (рис. *a*) и в отраженном (рис. *б*).

В настоящей работе описан способ определения координат анодных проволок в трубках с помощью проходящего видимого света. Для оценки и исключения систематических ошибок были проведены две серии независимых измерений на микроскопах разного типа. Приводятся новые результаты калибровочных измерений на микроскопе УИМ-23 с точностью $\sim \pm 1-2$ мкм. Показана также принципиальная возможность автоматизации процесса измерений. Приведены первые данные автоматических измерений на стереомикроскопе типа МБС с электронным окуляром, где получена точность измерений $\sim \pm 0,003$ мкм. Такое автоматизированное устройство можно использовать в реальных камерах.

1. МАКЕТ КАМЕРЫ

Тонкостенные дрейфовые трубки (строу) нового типа, на которых проводились измерения, были сварены по образующей из 36-мкм майларовой пленки с применением ультразвука. Они имеют диаметр 9,80 мм и покрыты изнутри медью и золотом с толщиной 0,05 и 0,02 мкм соответственно [8].

Макет с дрейфовыми трубками для этой работы был изготовлен с высокой механической точностью. Расположение трубок в два ряда, как и расстояния между ними, повторяли их геометрию в дрейфовых камерах для эксперимента НА62 (рис. 2). Межосевые расстояния гнезд для трубок, их соосность на концах и диаметры самих отверстий имели точность порядка 10 мкм. Количество трубок в макете равнялось 10, длина рабочей части — 150 мм. В качестве анода мы также использовали покрытую золотом 30-мкм вольфрамовую проволоку. В отличие от реальной камеры, в которой диаметр трубок обычно имеет определенный разброс, в нашем случае они были по диаметру отобраны строго одинаковыми (разброс был меньше 0,01 мм). Также строго были ото-

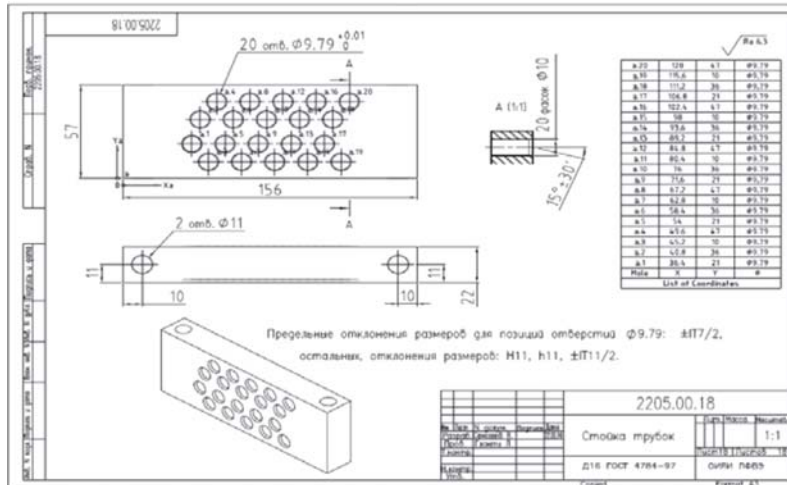


Рис. 2. Чертеж макета (в реальном макете были задействованы два ряда)

браны наконечники по посадочному диаметру трубок. Они устанавливались в наконечниках без люфта. Следовательно, можно с большой вероятностью считать, что разброс в расположении проволок в макете зависит в основном от разброса в диаметрах использованных для фиксации проволок пинов и отверстий под них в наконечниках.

Во время сборки реальных камер возникает разброс проволок от расчетного положения, зависящий от технологии сборки и некоторых других причин; и, по-видимому, этот разброс в камерах будет существенно больше.

2. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ НА МИКРОСКОПЕ УИМ-23

Стационарный микроскоп УИМ-23 позволяет перемещать и измерять объект с точностью $\sim \leq 1$ мкм, но в нашем случае реальная точность существенно зависела от умения оператора совмещать визир микроскопа с центром или краями проволоки. Для изучения возникающих при этом систематических ошибок измерения вначале проводили три оператора. При каждом измерении визир микроскопа последовательно подводился к двум краям изображения проволоки и считывались обе координаты. Их разность давала значение известного диаметра проволок (30 мкм). Распределения, полученные при измерении диаметра, приведены на рис. 3, а. Как видно, разброс у разных операторов вначале был значителен. Опытным путем было установлено, что тренировка операторов существенно улучшает качество измерений (рис. 3, б).

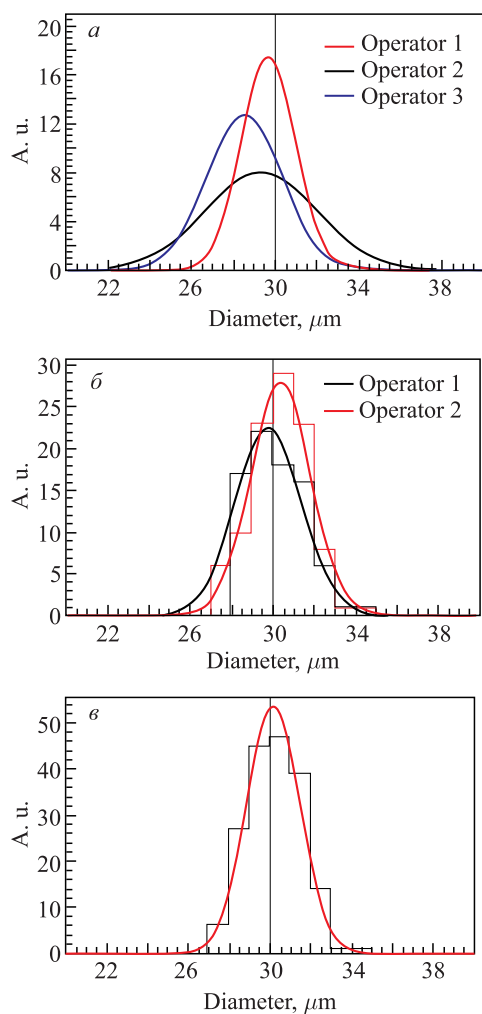


Рис. 3. Распределения измерений диаметра проволок: *a*) первые измерения; *б*) измерения после тренировки; *в*) усредненные данные от двух операторов

Для диаметра проволок была получена средняя величина $(29,8 \pm 1,0)$ мкм (рис. 3, *в*), что нам представляется вполне приемлемым. Отметим, что усреднение координат краев изображения проволоки позволяет определять ее центр более точно.

Поскольку в макете трубки расположены в два ряда (см. рис. 2), измерения осуществляются в два этапа. Сначала микроскоп фокусируют на проволоки в первом ряду, затем — во втором. Измерения координат отдельных

Таблица 1. Измерения двух слоев проволок с шагом 17,60 мм (здесь и далее измерения вверх и вниз проводились на расстоянии 135 мм вдоль трубок) на микроскопе УИМ-23

№-№ проволок	Оператор 1		Оператор 2		σ	Среднее
	10.07.2015	28.07.2015	09.07.2015	10.07.2015		
1-3 верх	17,627	17,630	17,630	17,632	0,002	17,630
1-3 низ	17,550	17,551	17,552	17,550	0,001	17,551
3-5 верх	17,664	17,667	17,668	17,668	0,002	17,667
3-5 низ	17,632	17,632	17,631	17,630	0,001	17,631
5-7 верх	17,591	17,588	17,588	17,587	0,002	17,589
5-7 низ	17,594	17,600	17,600	17,602	0,003	17,599
7-9 верх	17,605	17,609	17,607	17,606	0,001	17,607
7-9 низ	17,630	17,632	17,631	17,633	0,001	17,632
2-4 верх	17,704	17,710	17,712	17,708	0,003	17,709
2-4 низ	17,584	17,586	17,586	17,585	0,001	17,585
4-6 верх	17,569	17,571	17,572	17,572	0,001	17,571
4-6 низ	17,591	17,594	17,591	17,592	0,001	17,592
6-8 верх	17,592	17,596	17,592	17,597	0,002	17,594
6-8 низ	17,630	17,629	17,633	17,629	0,002	17,630
8-10 верх	17,579	17,580	17,579	17,577	0,001	17,579
8-10 низ	17,560	17,561	17,561	17,562	0,001	17,561

проволок следует проводить не менее чем в двух разделенных плоскостях вдоль трубок. Тогда по полученным координатам можно будет определить не только местоположение проволок в точке измерения, но и направление каждой проволоки. Средняя точность измерения расположения проволок, полученная нами на УИМ-23, равна $\pm 1-2$ мкм. Сводные результаты измерений расстояний между проволоками при шагах 17,60 и 8,80 мм приведены в табл. 1 и 2. Эти точности для предлагаемого нами метода в какой-то мере являются предельными. Достичь такой точности при работе с реальными камерами, по-видимому, будет трудно, но получить среднюю точность порядка $\pm 0,003- \pm 0,004$ мкм вполне реально. В практических случаях такая точность обычно достаточна.

На рис. 4 показано расположение девяти проволок относительно первой, измеренное на макете. Для наглядности масштабы отклонений концов проволок относительно их расчетного расположения (штрихпунктирные линии) увеличены.

Таблица 2. Измерения двух слоев проволок с шагом 8,80 мм на микроскопе УИМ-23

№-№ проволок	Оператор 1 (мм)		Оператор 2 (мм)		σ	Среднее
	07.10.2015	28.07.2015	09.09.2015	23.09.2015		
1-2 верх	8,910	8,914	8,912	8,911	0,002	8,912
1-2 низ	8,862	8,862	8,864	8,862	0,001	8,863
2-3 верх	8,719	8,715	8,720	8,718	0,002	8,718
2-3 низ	8,686	8,690	8,689	8,690	0,002	8,689
3-4 верх	8,988	8,992	8,992	8,993	0,002	8,991
3-4 низ	8,895	8,891	8,893	8,896	0,002	8,894
4-5 верх	8,676	8,677	8,671	8,675	0,003	8,675
4-5 низ	8,736	8,740	8,738	8,736	0,002	8,738
5-6 верх	8,897	8,896	8,898	8,894	0,002	8,896
5-6 низ	8,858	8,856	8,857	8,852	0,003	8,856
6-7 верх	8,691	8,692	8,694	8,694	0,002	8,693
6-7 низ	8,743	8,745	8,742	8,745	0,002	8,744
7-8 верх	8,900	8,901	8,899	8,900	0,001	8,900
7-8 низ	8,886	8,882	8,882	8,883	0,002	8,883
8-9 верх	8,706	8,705	8,706	8,707	0,001	8,706
8-9 низ	8,742	8,748	8,743	8,743	0,003	8,744
9-10 верх	8,871	8,876	8,871	8,872	0,002	8,873
9-10 низ	8,818	8,814	8,819	8,821	0,003	8,818

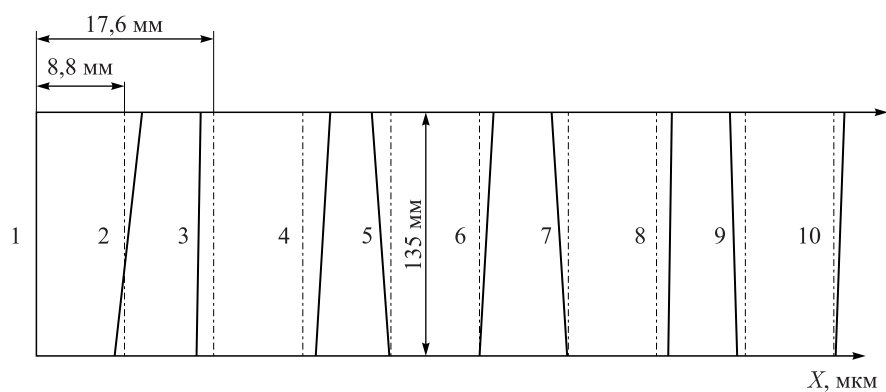


Рис. 4. Расположение проволок в макете

3. ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РАСПОЗНАВАНИЕМ ПРОВОЛОК

На следующем этапе были проведены измерения, приближенные к реальным условиям камер. На рис. 5 показана примерная схема определения местоположения проволок в трубках в проходящем свете, взятая из работы [6]. Она включает в себя макет камеры с трубками, микроскоп, осветитель в виде светодиодной матрицы и оптическую скамью. Их взаимное перемещение осуществлялось с точностью $\sim 0,6$ мкм с помощью оптической скамьи фирмы «Huber», управляемой компьютером [9]. Координаты проволок фиксировались стереомикроскопом типа МБС. Для сканирования их изображений и автоматической записи информации в компьютер был использован электронный окуляр фирмы «Levenhuk» с разрешением 5,1 Мп. В отличие от рис. 5, в данной работе перемещался сам макет относительно микроскопа.

Для просвечивания трубок при работе в проходящем свете (аналог пассивного метода [3]) мы применили неподвижный протяженный источник в виде светодиодной матрицы, закрепленный на макете позади трубок, как показано на рис. 5. При этом диоды на матрице были расположены с шагом, равным сдвигу шага трубок первого и второго рядов (8,80 мм). Каждый отдельный светодиод через стенки трубки освещал «свою» проволоку. Использованные светодиоды имели светящийся диаметр $\sim 1,5$ мм, поэтому их точное расположение относительно проволок не требовалось. В целом это упростило процесс измерения.

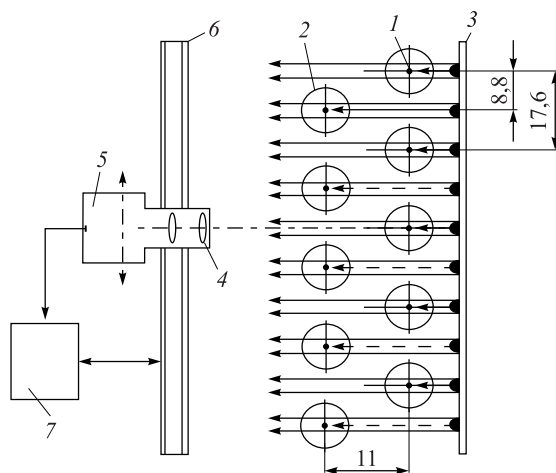


Рис. 5. Схема установки для измерения местоположения проволок в проходящем свете в полупрозрачной трубке: 1 — анодная проволока; 2 — полупрозрачные дрейфовые трубки; 3 — протяженный источник света (светодиодная матрица); 4 — микроскоп; 5 — электронный окуляр; 6 — оптическая скамья; 7 — управляющий компьютер

Требования, предъявляемые к оптике микроскопа, достаточно просты. Она должна иметь увеличение порядка $50-80\times$, относительно большое рабочее расстояние ($\sim 40-80$ мм) и, по возможности, большую глубину резкости. Для исключения влияния параллакса, присущего стереомикроскопам, трубки с проволоками располагались в плоскости, проходящей через оси стереотрубок микроскопа.

В полуавтоматическом режиме изображение проволоки записывается и обрабатывается в компьютере, который выдает таблицу координат. В случае ручного отсчета координат оператор непосредственно (или с помощью электронного окуляра) последовательно считывает координаты изображения проволоки при совпадении визира микроскопа с его краями.

Как отмечалось выше, для восстановления направления проволок в камере следует повторить измерения координат в другой плоскости. При вертикальном расположении трубок этих данных будет достаточно. Но для учета гравитационного прогиба горизонтально или наклонно расположенных трубок или при наличии в трубках поддержек для проволок потребуются дополнительные измерения вдоль проволок в нескольких местах, в зависимости от их свободной длины.

Для автоматизации процесса измерения было разработано приложение Straw Recognition, предназначенное для распознавания изображений анодных проволок и вычисления их смещения от расчетного положения. Кроме того, использование этой программы должно исключить систематические ошибки, характерные для ручных измерений.

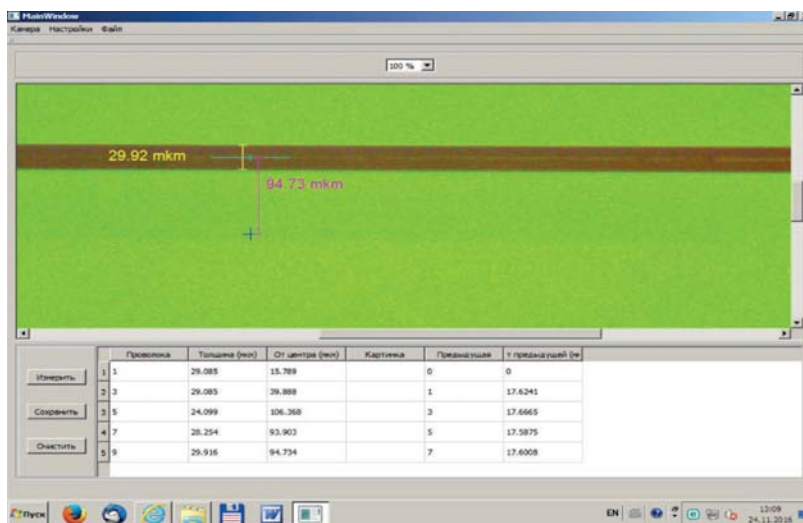


Рис. 6. Главное окно приложения Straw Recognition

Изображение в приложении Straw Recognition получалось непосредственно с микроскопа, без использования стандартного программного обеспечения фирмы «Levenhuk». Это ускоряет процесс распознавания и, кроме того, делает возможным в дальнейшем разработку практически полностью автоматизированной системы измерения.

Для создания графического интерфейса была использована библиотека Qt [10], а для обработки изображений — библиотека OpenCV [11]. Изображение главного окна приложения показано на рис. 6.

В работе использован следующий алгоритм распознавания изображения.

1. Получение изображения анодной проволоки с помощью микроскопа с электронным окуляром.
2. Подготовка изображения (адаптивная обработка фона, наложение фильтров для уменьшения уровня шума).
3. Получение градиента яркости изображения при помощи оператора Собеля [12].
4. Выявление изображения анодной проволоки.
5. Вычисление диаметра проволоки в микрометрах.
6. Вычисление смещения проволоки от центра кадра.
7. Вычисление расстояния от соседней проволоки.
8. Сохранение результатов измерения в виде файлов Excel и в виде изображений с нанесенными размерами.

Для перевода количества пикселей в микрометры было использовано два вида калибровки.

1. По измерению градуированной шкалы с делениями по 100 мкм.
2. По измерению перемещения оптической скамьи на известное расстояние (измерение изображений проволоки до и после перемещения в пределах одного поля видимости).

Калибровка по перемещению дает более надежный результат, поскольку, кроме оптических свойств микроскопа и окуляра, она основывается на высокой точности перемещения оптической скамьи.

Перемещая макет с шагом 17,6 мм в каждом ряду трубок, мы измеряли отклонение каждой анодной проволоки от центра кадра. По этим данным были вычислены расстояния между соседними проволоками. Полученные результаты сведены в табл. 3. Сравнение данных в табл. 1 и 3 показывает хорошее совпадение в пределах ошибок двух независимых измерений. На данном этапе точность ручных измерений на микроскопе УИМ-23 несколько выше.

Для дальнейшего развития автоматизации измерений можно выделить 4 важных задачи.

1. Доработка алгоритма распознавания с целью повышения точности измерений при неидеальных условиях (при слабом освещении или сбитем фокусе).

Таблица 3. Измерения двух слоев проволок на микроскопе МБС с электронным окуляром

№-№ проволок	Оператор 1		Оператор 2		σ	Среднее
	19.10.16	19.10.16	29.10.16	29.10.16		
1-3 верх	17,632	17,637	17,632	17,632	0,003	17,633
1-3 низ	17,669	17,670	17,667	17,667	0,002	17,668
3-5 верх	17,590	17,590	17,587	17,587	0,002	17,589
3-5 низ	17,606	17,604	17,608	17,608	0,002	17,607
5-7 верх	17,712	17,711	17,712	17,708	0,002	17,711
5-7 низ	17,572	17,573	17,571	17,572	0,001	17,572
7-9 верх	17,593	17,596	17,589	17,591	0,003	17,592
7-9 низ	17,578	17,579	17,576	17,578	0,001	17,578
2-4 верх	17,554	17,550	17,554	17,553	0,002	17,553
2-4 низ	17,633	17,634	17,628	17,629	0,003	17,631
4-6 верх	17,600	17,601	17,599	17,599	0,001	17,600
4-6 низ	17,631	17,629	17,627	17,627	0,002	17,629
6-8 верх	17,584	17,588	17,585	17,585	0,002	17,586
6-8 низ	17,594	17,593	17,591	17,592	0,001	17,593
8-10 верх	17,628	17,631	17,627	17,628	0,002	17,629
8-10 низ	17,560	17,563	17,559	17,556	0,003	17,560

2. Доработка интерфейса приложения Straw Recognition для удобства его использования.

3. Управление перемещением оптической скамьи непосредственно из программы Straw Recognition без использования отдельного программного обеспечения.

4. Автоматизация подстройки фокусного расстояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тонкостенных трубках нового типа для эксперимента NA62, которые оказались полупрозрачными для видимого света, с помощью оптического микроскопа можно измерить местоположение анодных проволок как в проходящем, так и в отраженном свете. В настоящее время использование таких трубок предполагается и в других экспериментах.

Калибровочные измерения в проходящем свете на микроскопе УИМ-23 показали, что можно достичь точности порядка 1–2 мкм. Измерения, приближенные к реальным условиям с помощью обычного микроскопа типа МБС

и макета, расположенного на оптической скамье «Huber», проводились при помощи электронного сканирования в полуавтоматическом режиме. Это позволяет устранить систематические ошибки, возникающие при совмещении оператором визира микроскопа с краем проволоки. Автоматизированные измерения дают результаты, статистически совместимые с калибровочными данными от УИМ-23.

В дальнейшем процесс измерения можно практически полностью автоматизировать, исключая привязку координат к корпусу камеры.

В будущем представляется важным получить такие же результаты при работе с отраженным светом, так как измерения в отраженном свете имеют важное преимущество — позволяют располагать и микроскоп, и осветитель на одной стороне плоскости трубок. Это особенно удобно при отсутствии доступа к трубкам с другой стороны камеры для освещения проволок. В остальном они идентичны с измерениями в проходящем свете, но в настоящее время требуют трудоемкой настройки освещения. По-видимому, было бы полезно разработать специальный источник света, позволяющий простым способом получить качественное изображение проволоки в отраженном свете.

Предложенный здесь метод удобен тем, что измерения можно проводить как до, так и после сборки камеры. Кроме того, его можно применить для исследования смещения анода в трубке под влиянием электрического поля, после подачи в трубку высокого напряжения. В принципе, возможно также одновременное измерение местоположения как проволок, так и самих трубок.

В заключение авторы выражают свою глубокую благодарность Н. И. Барановой, А. П. Сиротину и В. Н. Шаляпину за действенную помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akesson T. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 463. P. 129–141.
2. Akesson T. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 507. P. 622–635.
3. Oh S. H. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 325. P. 142–146.
4. Proposal CERN, 11.06.05. CERN-SPSC-2005-013, Retrieved 2009-09-28.
5. Azorskiy N. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 569–570.
6. Glonti L. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 532–534.
7. Глonti Л. Н. и др. Патент РФ № 2602492. Устройство для измерения местоположения проволок в газовых проволочных камерах.
8. Азорский Н. И. и др. Препринт ОИЯИ Р13-2016-33. Дубна, 2016.
9. Huber 5101.30-300-X2.
10. Qt Framework for Cross-Platform Software Development: www.qt.io/ru.
11. Open source computer vision: www.opencv.org.
12. Sobel operator: https://en.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator.

Получено 25 ноября 2016 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 07.02.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,07. Тираж 140 экз. Заказ № 59024.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/