

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.08, 52-735

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ
НА ЖИДКИХ ОБРАЗЦАХ

©2026 г. В. Н. Заблуда^{a,b}, О. С. Иванова^{a,*}, И. С. Эдельман^a,
А. С. Кичкайло^{b,c}, Р. В. Морячков^b

^aИнститут физики им. Л.В. Киренского

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50

^bКрасноярский научный центр

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50

^cКрасноярский государственный медицинский университет

им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого

Россия, 660022, Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

*e-mail: osi@iph.krasn.ru

Поступила в редакцию 05.09.2025 г.

После доработки 29.09.2025 г.

Принята к публикации 10.10.2025 г.

Разработан и испытан держатель жидких образцов для проведения измерений методом малоуглового рентгеновского рассеяния, позволяющий значительно увеличить отношение сигнал/шум при малом количестве объекта исследования. Предлагаемое устройство состоит из вертикально расположенного капилляра из химически стойкого материала диаметром 0.005–5.0 мм, нижний срез которого жестко зафиксирован над центром падающего рентгеновского луча на расстоянии радиуса капли. Капля жидкого образца выдавливается через нижний срез капилляра. Силы поверхностного натяжения обеспечивают сферичность формы капли идерживают ее на конце капилляра. Рассеяние луча, проходящего через каплю, является осесимметричным, поскольку сферическая форма капли образца наилучшим образом соответствует этому требованию. Нахождение образца в таком устройстве исключает наличие дополнительных элементов в пучке излучения, могущих вносить искажения в сигнал, что позволяет проводить высокоточные измерения методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Проведены тестовые измерения, показавшие существенно более изотропную картину рассеяния, определены оптимальные взаимные расположения луча излучения и капли образца. Простота

предложенной конструкции держателя и универсальность для измерения различных образцов являются неоспоримыми преимуществами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) представляет собой диффузное рассеяние рентгеновского излучения и нейтронов на апериодических флюктуациях плотности в веществе, размеры которых существенно превышают длину волны излучения, которая составляет $\lambda = 0.05\text{--}0.5$ нм. Вследствие этого метод МУРР находит широкое применение для получения информации о форме и строении огромного числа неоднородностей, размеры которых лежат в диапазоне от 1 до 1000 нм: белковых молекул, поверхностно-активных веществ, различных дисперсных систем, эмульсий, волокон, жидких кристаллов и т.д. [1–5]. Проходя сквозь образец, пучок рассеивается и регистрируется при помощи детекторов. Картина малоуглового рассеяния, как и дифракционная картина, является результатом интерференции лучей, рассеянных на образце. Направления рассеянных лучей отклоняются от направления падающего луча на углы 0.1–10°. Существуют различные методики анализа зависимости интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния, по которым определяют характеристики наноразмерных элементов, например, форму, размер упорядоченных участков и т.д. [6–9].

Правильность извлеченных данных из анализа кривой МУРР напрямую зависит от отношения сигнал/шум, так как наличие шумов затрудняет установление адекватных аналитических зависимостей и приводит к ошибкам решения. Специфика измерения в проходящем свете жидких образцов такова, что их необходимо поместить в определенную кювету, прозрачную для данного вида излучения. Из-за того, что паразитный сигнал от кюветы необходимо учитывать, малоинтенсивные компоненты от исследуемых образцов могут маскироваться шумами, и их трудно или невозможно выявить. Отметим, что объем исследуемого образца при этом должен быть достаточным для заполнения кюветы. Границы кюветы могут вносить различные искажения в рассеиваемый сигнал (наличие входных граней окон, поглощение самих окон, неоднородность материала окон, кривизна, не параллельная установка и т.д.). Эффективная кривая рассеяния на образце определяется путем измерений распределения радиальной интенсивности рассеяния на кювете с образцом и без образца [10]. Правильность извлеченных данных из анализа кривой МУРР напрямую зависит от отношения сигнал/шум.

Требования, предъявляемые к кюветам (держателям) для жидких образцов, сводятся к следующему. Во-первых, для уменьшения поглощения синхротронного излучения с длиной волны около 1.5 Å необходима малая толщина стенки кюветы. Во-вторых, необходимо

применение однородных нерассеивающих материалов, слабо поглощающих излучение этого диапазона. Для водных растворов оптический путь не должен превышать нескольких миллиметров, чтобы минимизировать поглощение в самом образце. Поэтому, в-третьих, кювета должна вмещать крайне малое количество жидкости с образцом и позволять легко ее очищать и изменять содержимое. В настоящее время при МУРР-измерениях применяются в основном кюветы в форме капилляров, например кварцевые капилляры фирмы GLAS, Германия, имеющие диаметр 1–1.5 мм и толщину стенки 0.01 мм. Жидкий образец помещается в верхнюю (более широкую) часть капилляра и опускается в более узкую (через которую будет проходить излучение) центрифугированием на скоростях 1000–2000 об/мин. Иногда капилляр необходимо нагревать до температур около 60 °C, при этом для предотвращения испарения воды широкая часть капилляра запаивается на газовой горелке. Герметичность запаянной части проверяется на микроскопе, при этом часты появления дефектов — как при пайке, так и при изготовлении капилляров [11]. С точки зрения герметизации, использование стеклянных капилляров вместо кварцевых имеет преимущество, так как стеклянные капилляры практически не дают дефектов при пайке (их температура размягчения составляет 815 °C, а температура размягчения кварца равна 1730 °C). Одним из недостатков стеклянных капилляров, который ограничивает их использование в экспериментах на синхротронных источниках, является их хрупкость. Тонкие стеклянные капилляры имеют большую вероятность разрушения при установке в держатель, что приводит к полной потере образца и необходимости чистки держателя. В капиллярах размещается 10–30 мкг исследуемого образца. Малое количество используемого образца является преимуществом применения капилляров по сравнению с прямоугольными кюветами, но в любом случае использование двух кювет/капилляров для проведения измерений образца, в каждом из которых по два окна (входное и выходное), создает систематическую ошибку, связанную с возможным различием диаметров капилляров и толщин стенок в области прохождения пучка. Кроме этого, круглое сечение стандартного кварцевого капилляра приводит к уменьшению эффективной апертуры и появлению дополнительного паразитного рассеяния. Также использование капилляров приводит к тому, что волновой фронт пучка рентгеновского излучения искажается сферичностью стенок капилляра, которая при отношении диаметра капилляра к размеру пучка менее 10 может приводить к заметным погрешностям при проведении экспериментов. Данное обстоятельство существенно снижает отношение сигнал/шум, особенно для слабо рассеивающих и сильно поглощающих образцов.

В работе [12] описана конструкция ячейки для исследований структуры растворов методом МУРР с плоскопараллельными окнами из рентгенопрозрачных пленок слюды,

толщиной 30 мкм (материал по ГОСТ 13750-88, марка СОВ), которая состоит из двух резервуаров объемом примерно 18 мкл: один для образца, другой для растворителя образца. Такая конфигурация позволяет загрузить и исследовать за один раз и образец, и растворитель, что экономит время по сравнению с последовательной загрузкой. Уровень шума экспериментальных данных МУРР оказывается значительно ниже при использовании ячейки с плоскопараллельными окнами по сравнению со стандартным кварцевым капилляром. Но недостатком этого устройства также является необходимость учета сигнала от окон и вносимого этими элементами шума.

Таким образом, наличие окон нежелательно во всех случаях проведения экспериментов в проходящем луче, а необходимость исследования образцов объемами менее 1 мкл (1 mm^3) также не обеспечивается существующими конструкциями. Описанные выше сложности использования кювет для МУРР делают необходимыми поиски новых решений и создание держателя образца, минимизирующего влияние нежелательных факторов и позволяющего значительно увеличить отношение сигнал/шум.

В настоящей работе предложен универсальный держатель жидких образцов для применения в технике МУРР, позволяющий повысить отношение сигнал/шум и надежность измерения проб жидких образцов с одновременным уменьшением объема исследуемого вещества.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Держатель жидкого образца для проведения измерений методом МУРР состоит из вертикально расположенного капилляра малого диаметра, на нижнем срезе которого выдавливается капля жидкого образца. Силы поверхностного натяжения обеспечивают сферичность формы капли идерживают ее на конце капилляра. Подача образца в пучок излучения таким образом исключает наличие дополнительных элементов в пучке, могущих вносить искажения в сигнал, при этом объем капли на конце капилляра имеет величину от 0.2 до 5.0 мкл (радиус капли до 1.1 мм) в зависимости от диаметра капилляра. Сферическая форма капли, висящей на капилляре, обеспечивает осесимметричное рассеяние рентгеновского луча. Это позволяет проводить измерения МУРР непосредственно на жидком образце малого объема, резко увеличивает эффективную апертуру (по сравнению с капиллярами) и не требует учета сигнала от окон и вносимого ими шума.

На рис. 1а приведена схема расположения держателя жидких образцов относительно направления излучения в эксперименте по МУРР. На рис. 1б показана фотография капли на конце капилляра, когда в качестве капилляра взята игла микрошприца МШ10 с внешним диаметром капилляра 0.5 мм.

Рис.1. Схема расположения держателя жидких образцов относительно луча излучения в эксперименте по МУРР (а)

Для проведения измерений через нижний срез вертикально расположенного капилляра малого диаметра выдавливается капля жидкости (в нашем случае воды) сферической формы. Нижний срез капилляра фиксируется над падающим рентгеновским лучом на расстоянии радиуса капли от его центра. Поперечное сечение пучка синхротронного излучения, используемого в данном эксперименте, не более $0.3 \times 0.4 \text{ мм}^2$, что значительно меньше диаметра капли. Диаметр капли зависит от количества выдавленной жидкости и ее типа.

Рентгеновские лучи, как и видимый свет, распространяются прямолинейно и преломляются при прохождении через границу раздела двух сред согласно закону Снеллиуса, однако для рентгеновских лучей коэффициент преломления $n \approx 1$, более того, n меньше единицы практически для всех конденсированных сред на величину порядка 10^{-6} – 10^{-5} . Поэтому для рентгеновских лучей вакуум оказывается оптически наиболее плотной средой, и направление рентгеновского луча при переходе в конденсированную среду отклоняется на больший угол по отношению к нормали к поверхности раздела по сравнению с падающим лучом.

Оценим расходимость пучка при прохождении капли жидкого образца. Поскольку капля исследуемого вещества представляет собой двояковыпуклую линзу, определим ее фокусное расстояние (F), используя формулу линзы:

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где n – показатель преломления для рентгеновских лучей, R_1, R_2 – радиусы кривизны линзы, в нашем случае они одинаковы. Так, для рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda \approx 0.1 \text{ нм}$ (12 кэВ), среды с $n \approx 0.99999$, R_1, R_2 , не превышающими примерно 1 мм, фокусное расстояние будет равно приблизительно 50 м, и угол отклонения составит 0.00115° ($1.999 \cdot 10^{-5}$ рад). Такие отклонения пренебрежимо малы по сравнению с отклонениями, обусловленными рассеянием на нанообъектах. Например, средний эффективный размер NSP3t-ДНК-аптамера к N-белку коронавируса SARS-CoV-2 не превышает 10 нм [13], что для указанных параметров дает отклонение около десяти градусов.

Поскольку форма капли важна для адекватной интерпретации измерений, проведена оценка радиуса капли, при котором ее форма близка к сферической, и она устойчиво держится на капилляре, в зависимости от природы некоторых жидкостей и диаметра капилляра. Капля жидкости будет устойчиво висеть и иметь сферическую форму, пока сила поверхностного натяжения ($F_{\text{пов}}$) будет больше силы гравитации ($F_{\text{тяж}}$):

$$F_{\text{тяж}} \leq F_{\text{пов}}, \quad (2)$$

$$\rho V g \leq \sigma 2\pi r_k, \quad (3)$$

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho g \leq \sigma 2\pi r_k, \quad (4)$$

$$r_k \geq \frac{2R^3 \rho g}{3\sigma}, \quad (5)$$

где V – объем шара, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, R – радиус капли, r_k – радиус капилляра, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

При радиусе капли, равном $R=1 \cdot 10^{-3}$ м, плотности воды $\rho=1000$ кг/м³, поверхностном натяжении при $T=20$ °C, равном $\sigma=72.5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², получаем $r_k=0.09 \cdot 10^{-3}$ м. Таким образом, диаметр капилляра должен быть не меньше, чем примерно 0.2 мм. Следовательно, для исследования малых количеств жидких образцов на водной основе, радиус капли которых находится в пределах от 0.3 до 2 мм, размеры внешнего диаметра капилляра должны быть не менее 0.02–1.5 мм (кривая 1 на рис. 2, табл. 1.).

Рис. 2. Зависимости минимального размера внешнего диаметра капилляра D от радиуса r капли жидкого образца

Для жидкостей, содержащих углеводороды, размер капли, а соответственно капилляра, может быть больше, поскольку они состоят из более легких элементов и к тому же поглощение в них меньше. На рис. 2 кривая 2 демонстрирует зависимость минимального внешнего диаметра капилляра от желаемого радиуса капли нефти, для которой при $T=20$ °C имеем $\sigma=0.03$ Дж/м² и $\rho=820$ кг/м³. На рис. 2 видно, что для малых количеств жидких образцов на углеводородной основе, радиус капли которых находится в пределах от 0.3 до 2 мм, диапазон внешнего диаметра капилляра составляет 0.05–3 мм.

Для жидких металлов, например ртути, необходим маленький размер капли, несмотря на то что поверхностное натяжение у нее чрезвычайно большое ($\sigma=0.52$ Дж/м²), ртуть тяжелая ($\rho=13600$ кг/м³) и очень сильно поглощает излучение. Поэтому для исследования жидких образцов ртути, радиус капли которой находится в пределах от 0.3 до 2 мм, размер внешнего диаметра капилляра должен быть практически одинаковым с таковым для капилляров, используемых для воды, т. е. 0.05–2.8 мм (кривая 3 на рис. 2).

Таблица 1. Значения минимального внешнего диаметра капилляра для получения капли определенного размера жидким образцом на основе воды, нефти и ртути

Радиус капли R , мм	Диаметр капилляра D , мм		
	Вода	Нефть	Ртуть
0.5	0.023	0.045	0.043
0.6	0.039	0.078	0.075
0.7	0.062	0.123	0.118
0.8	0.092	0.184	0.176
0.9	0.131	0.262	0.250
1	0.180	0.359	0.343
1.2	0.311	0.619	0.593
1.4	0.493	0.983	0.941
1.6	0.736	1.468	1.405
1.8	1.048	2.090	2.0
2	1.437	2.866	2.743

При испарении в нормальных условиях время жизни капли воды оценено в работе [14], согласно которой время естественного испарения капли воды размерами, используемыми в эксперименте МУРР, должно составлять десятки минут. Проведенные нами эксперименты подтвердили это. Поскольку время испарения зависит от температуры, оценим, происходит ли нагревание капли в предлагаемом устройстве во время эксперимента под действием пучка падающего рентгеновского излучения. Энергию падающих фотонов в пучке оценим, используя формулу

$$E = hc/\lambda. \quad (6)$$

Для используемой длины волны излучения $\lambda=0.15$ нм = $1.5 \cdot 10^{-10}$ м и числа фотонов в секунду $N=10^{10}$ энергия падающего луча будет

$$E = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1.5 \cdot 10^{-10}} \cdot 10^{10} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \approx 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

При полном поглощении в образце она будет соответствовать количеству теплоты, переданному образцу. При удельной теплоемкости воды $q = 4200$ Дж/(кг·°С) эта теплота приведет к изменению температуры образца $\Delta T = E/qm \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ °С/с. Поскольку эксперименты по МУРР проходят при нормальных условиях и время измерения (в зависимости от свойств исследуемого вещества) составляет от нескольких секунд до единиц минут, изменение температуры капли при прохождении через нее пучка пренебрежимо мало, и им можно пренебречь.

Отметим, что принципиального значения материал капилляра не имеет, в эксперименте он участия не принимает, луч излучения проходит только через исследуемый

образец. Основное требование – это химически стойкий материал для исключения реакции с жидким образцом. Это может быть металлический капилляр, например стальной (ГОСТ 14162-79 – трубы стальные малых размеров (капиллярные)), стеклянный (ГОСТ 27460-87 – трубы, капилляры и палочки из боросиликатного стекла) или кварцевый капилляр (ГОСТ 16548-80 – кварцевое стекло и изделия из него). Главное – размер капилляра, обеспечивающий необходимый размер капли исследуемого образца, и химическая стойкость материала.

3. ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Описанное устройство использовано для проведения исследования методом МУРР структуры NSP3t-ДНК-аптамера к N-белку коронавируса SARS-CoV-2 в растворе DPBS. Концентрация аптамера в растворе составляла 5 мг/мл. Капилляр (стальная игла) имел внешний диаметр 0.5 мм, внутренний диаметр 0.2 мм и длину 20 мм. Капилляр был жестко зафиксирован, нижний срез находился над осью пучка на расстоянии 0.5 мм. Выдавливалась капля образца объемом около 1 мкл с радиусом примерно 0.75 мм. Измерения МУРР были проведены на станции БиоМУР в Курчатовском центре синхротронных и нейтронных исследований в НИЦ “Курчатовский институт”. Образцы были экспонированы синхротронным рентгеновским излучением с энергией 8 кэВ в течение 10 мин, расстояние от образца до детектора Pilatus3 1M составляло 1 м. ДНК-аптамер к N-белку коронавируса tNSP3 имеет олигонуклеотидную последовательность из 44 нуклеотидов (CAGCGTCACG TGTTGTTCCC CATTGTACTG ATT CGTCGTG GCAT) и молекулярную массу 13.47 кДа; DPBS — это физиологический раствор с фосфатным буфером Dulbecco.

На рис. 3 приведены кривые радиального распределения рассеяния, полученные при пропускании рентгеновского луча через каплю раствора, содержащего аптамеры, при различных положениях луча относительно центра капли (кривые 1–4), а также при пропускании луча через такой же раствор, помещенный в кювету диаметром 2 мм с толщиной стенок 0.01 мм (кривая 5). Видно, что в случае использования капли резко возросла интенсивность сигнала для больших углов рассеивания, связанных с малыми включениями. Очевидно, это обусловлено увеличением эффективной апертуры регистрируемого пучка излучения. Некоторая зависимость интенсивности рассеяния пучка от отклонения от центра капли показала, что для исключения проявления краевых эффектов оптимальным является прохождение луча по центру или чуть ниже центра капли.

Рис. 3. Зависимость радиального распределения интенсивности рассеяния при измерении МУРР

4. ВЫВОДЫ

Предложен держатель жидкого образца для проведения измерений методом МУРР, представляющий собой вертикально расположенный капилляр из химически стойкого материала диаметром 0.005–5.0 мм, нижний срез которого жестко зафиксирован над рентгеновским лучом на расстоянии радиуса капли образца. Сферичность капли жидкого образца, выдавливаемой через нижний срез капилляра, обеспечивается силами поверхностного натяжения, которые и удерживают ее длительное время на конце капилляра. Сферическая форма капли обуславливает осесимметричное рассеяние проходящего через жидкий образец излучения и делает максимальной апертуру регистрируемого сигнала. Нахождение образца в таком устройстве исключает наличие дополнительных элементов в пучке излучения, могущих вносить искажения в сигнал. Использование такого держателя позволяет проводить высокоточные измерения МУРР, поскольку значительно увеличивается отношение сигнал/шум при малом количестве объекта исследования. Простота и универсальность конструкции при исследовании любых жидких образцов являются неоспоримыми преимуществами, во многих случаях предложенная установка может стать альтернативой использования сложных конструкций кювет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной тематики государственного задания ИФ СО РАН, исследования биологических образцов выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №25-72-20052).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свергун Д.И., Штыкова Э.В., Волков В.В., Фейгин Л.А. // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 5. С. 777. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16555978>
2. Joseph JS, Liu W, Kunken J, Weiss TM, Tsuruta H, Cherezov V. // Methods. 2011. V. 55. № 4. P. 342. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2011.08.013>.
3. Shtykova E.V., Volkov V.V., Konarev P.V., Dembo A.T., Makhaeva E.E., Ronova I.A., Khokhlov A.R., Reynaers H., Svergun D.I. // J. Appl. Cryst. 2003. V. 36. P. 669. <https://doi.org/10.1107/S0021889803006198>
4. Волков В.В., Лившиц В.А., Мешков Б.Б., Асадчиков В.Е. // Кристаллография. 2023. Т. 68. № 6. С. 894. <https://doi.org/10.31857/S0023476123600672>

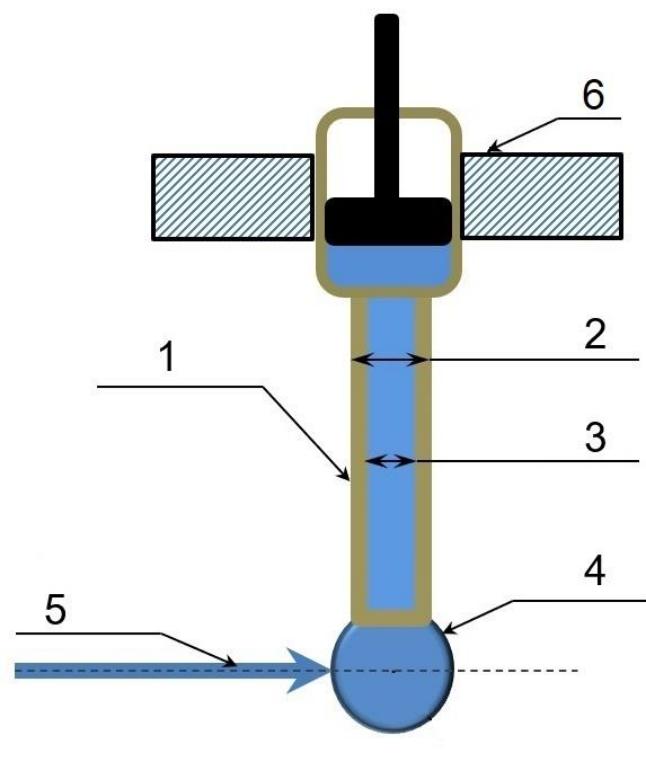
5. Morozov D., Mironov V., Moryachkov R.V. et al. // Mol. Ther. Nucleic Acids. 2021. V. 25. P. 316. <https://doi.org/10.1016/j.omtn.2021.07.015>
6. Doniach S. // Chem. Rev. 2001. V.101. №. 6. P. 1763. <https://doi.org/10.1021/cr990071k>
7. Manalastas-Cantos K., Konarev P.V., Hajizadeh N.R. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2021. V. 54. P. 343. <https://doi.org/10.1107/S1600576720013412>
8. Svergun D., Barberato C., Koch M.H.J. // J. Appl. Crystallogr. 1995. V. 28. P. 768. <https://dx.doi.org/10.1107/s0021889895007047>
9. Конарев П.В., Волков В.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т.14(4). С. 408. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050244>
10. Чижов П., Левин Э., Митяев А., Тимофеев А. Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции. Учебное пособие. Москва: Изд. МФТИ, 2011.
11. Сидельников В.Н. // Лаборатория и производство 2019. № 5. С. 118. <https://doi.org/10.32757/2619-0923.2019.5.9.118.128>
12. Ильина К.Б., Конарев П.В., Суханов А.Е. и др. // ПТЭ. 2024. № 3. С. 91. <https://elibrary.ru/item.asp?id=77095365>
13. Новикова И. А. // Живые и биокосные системы. 2021. № 35. С. 4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=45799905>
14. Дохов М.П.// Фундаментальные исследования. 2006. № 10. С. 65. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9932060>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Схема расположения держателя жидкого образца относительно луча излучения в эксперименте по МУРР (а): 1 – капилляр, 2 – внешний диаметр капилляра (D), 3 – внутренний диаметр капилляра (d), 4 – капля образца, 5 – луч излучения, 6 – фиксаторы устройства в измерительной камере. Фотография капли на игле микрошприца МШ10 с внешним диаметром капилляра 0.5 мм, радиус капли воды равен примерно 0.9 мм (б).

Рис. 2. Зависимости минимального размера внешнего диаметра капилляра D от радиуса r капли жидкого образца на водной основе (кривая 1), для нефти (кривая 2) и ртути (кривая 3).

Рис. 3. Зависимость радиального распределения интенсивности рассеяния при измерении МУРР образца NSP3t-ДНК-аптамера к N-белку коронавируса SARS-CoV-2 в растворе DPBS в предлагаемом держателе жидкого образца при различных положениях капли с раствором относительно падающего луча: кривая 1 – пучок по центру капли, кривая 2 – пучок на 0.5 мм выше центра капли, кривая 3 – пучок на 0.3 мм сбоку центра капли, кривая 4 – пучок на 0.5 мм ниже центра капли, кривая 5 – образец в кварцевой кювете диаметром 2 мм и толщиной стенок 0.01 мм.



(а)



(б)

Рис. 1.

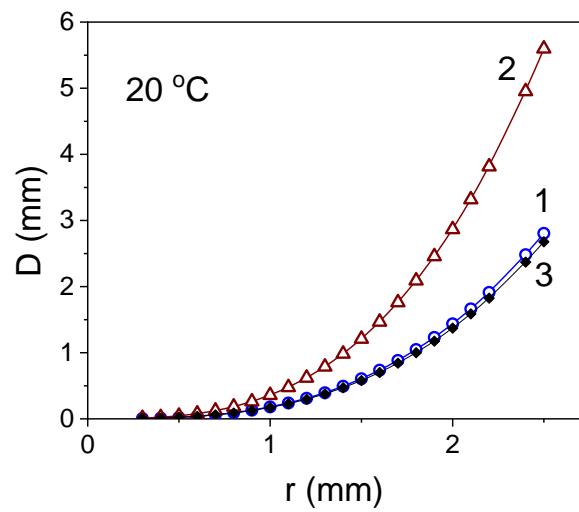


Рис.2

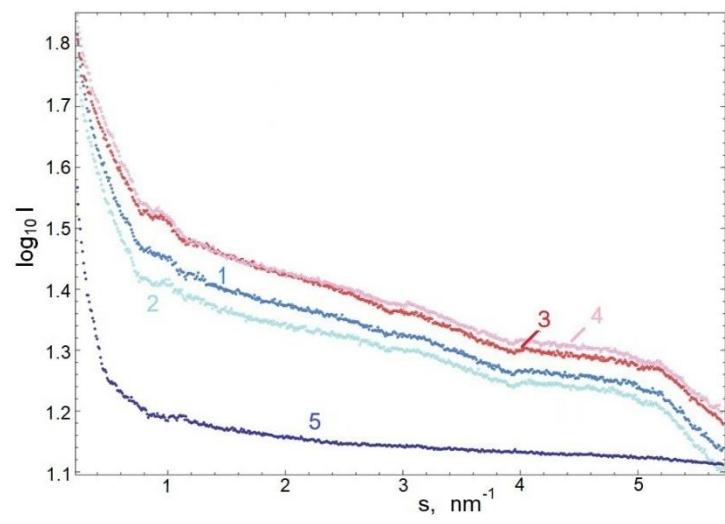


Рис. 3