

μSR rotation
relaxation
resonance

m s
u p
o i
n n



**μSR-ИССЛЕДОВАНИЯ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ПИЯФ**

**Воробьев С.И.
(Лаборатория Мезонной Физики)**

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 23 - 26 декабря 2025 г.

Исследование эластомеров с наночастицами CoFe_2O_4 с помощью μSR -метода

Для исследования μSR -методом магнитных свойств магнитореологических эластомеров были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 64 мм и толщиной 9 мм.

Подготовлено два набора образцов с концентрацией 1, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц CoFe_2O_4 .

Полимеризация образцов второго набора была проведена в магнитном поле 80 кА/м, перпендикулярном плоскости диска.

В качестве матрицы использована силиконовая резина (silicon rubber (SR), Globasil AD 27 type, from Globalchimica SRL), в которую перед полимеризацией вводилась феррожидкость.

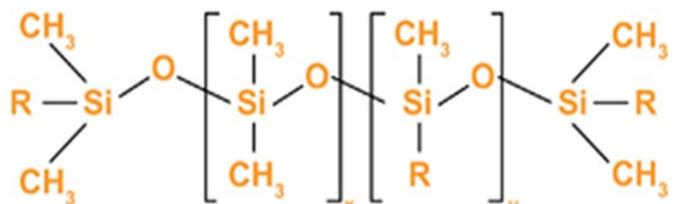
Феррожидкость с 3% концентрацией магнитных наночастиц в воде была стабилизирована с использованием в качестве ПАВ додецилсульфат натрия $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}$ с плотностью $\rho = 1.01 \text{ г}/\text{cm}^3$ и лауриновой кислоты $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$ с плотностью $\rho = 0.88 \text{ г}/\text{cm}^3$. Один мл феррожидкости содержал 0.17 г феррита кобальта, а на 1 г CoFe_2O_4 приходилось 0.25 г ПАВ.

Распределение наночастиц по размерам: $D_0 = 7.8 \pm 0.1 \text{ нм}$, $\sigma = 0.40 \pm 0.01 \text{ нм}$.

Sample volume=32cm³

$P_0 : \Phi_1=0\%$ at $H=0\text{kA}/\text{m}$;
 $P_1 : \Phi_1=1\%$ at $H=0\text{kA}/\text{m}$;
 $P_2 : \Phi_1=5\%$ at $H=0\text{kA}/\text{m}$;
 $P_3 : \Phi_1=10\%$ at $H=0\text{kA}/\text{m}$;
 $P_4 : \Phi_1=15\%$ at $H=0\text{kA}/\text{m}$.

$P_{1m} : \Phi_1=1\%$ at $H=80\text{kA}/\text{m}$;
 $P_{2m} : \Phi_1=5\%$ at $H=80\text{kA}/\text{m}$;
 $P_{3m} : \Phi_1=10\%$ at $H=80\text{kA}/\text{m}$;
 $P_{4m} : \Phi_1=15\%$ at $H=80\text{kA}/\text{m}$.



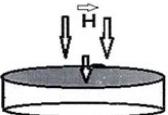
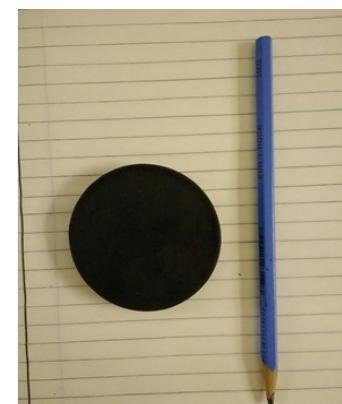


Рис. 1. Образцы эластомеров.

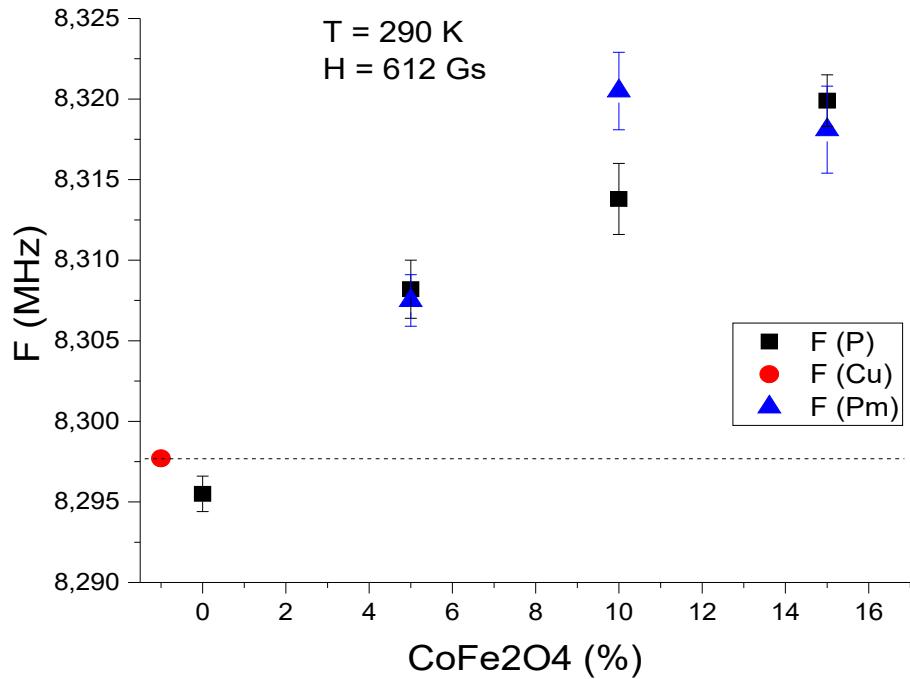


Фотография образца Р0
(0% наночастиц CoFe_2O_4)



Фотография образца Р4
(15% наночастиц CoFe_2O_4)

Исследование эластомеров с наночастицами CoFe_2O_4 с помощью μSR -метода



Зависимость частоты прецессии спина мюона от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 при температуре 290 К в магнитном поле $H = 612 \text{ Гс}$: чёрные квадраты – Р образцы, синие треугольники – P_m образцы и красная точка – медный образец

Получены предварительные результаты измерения магнитной восприимчивости χ микроскопической структуры эластомеров в зависимости от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 .

μSR -методом было проведено исследование магнитных свойств эластомеров в зависимости от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 во внешнем поперечном магнитном поле 612 Гс при температуре 290 К.

Измерена величина магнитного поля, создаваемого однодоменными наночастицами CoFe_2O_4 , которая увеличивается пропорционально концентрации наночастиц.

Исследование эластомеров с наночастицами CoFe_2O_4 с помощью μSR -метода

На рисунке 1 показано поведение асимметрии в зависимости от концентрации наночастиц в образце. Видно, что проводящие свойства образцов не зависят от концентрации примеси. Во всех образцах большее половины остановившихся мюонов образуют мюоний и быстро теряют поляризацию за время меньше 9 нс.

На рисунке 2 показано поведение скорости релаксации поляризации мюона λ в зависимости от концентрации магнитных наночастиц в образцах. Наблюдается устойчивый рост скорости релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце, по мере увеличения количества наночастиц CoFe_2O_4 в исследуемых образцах.

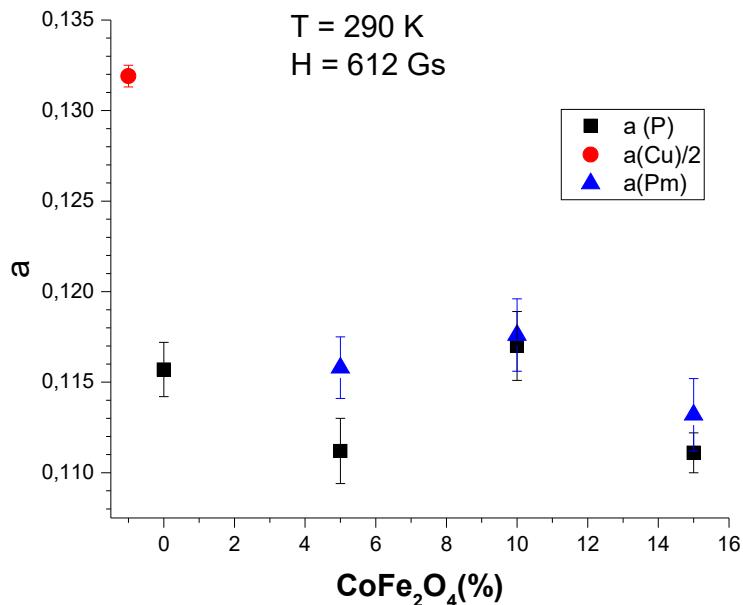


Рис. 1. Зависимость амплитуды прецессии спина мюона от величины концентрации CoFe_2O_4 .

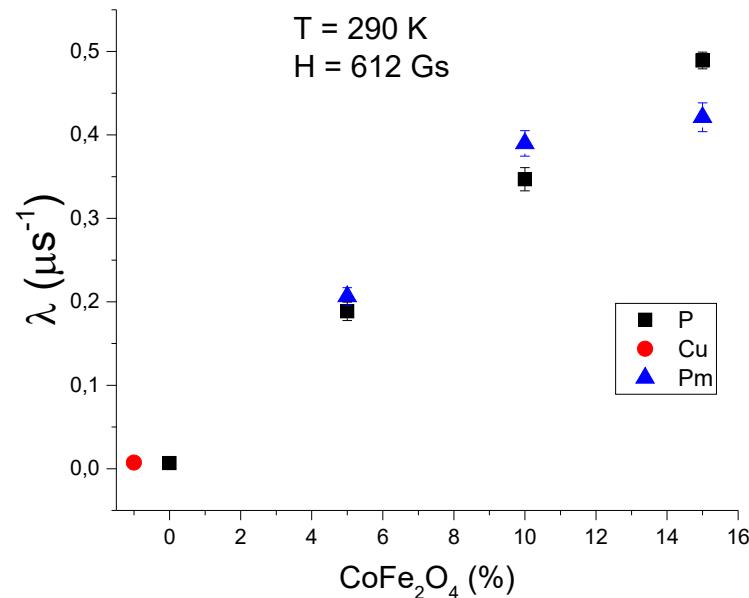


Рис. 2. Зависимость скорости релаксации поляризации мюона от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 : чёрные квадраты – P образцы, синие треугольники – P_m образцы и красная точка – медный образец.

Исследования необходимо продолжить

Фаза прецессии положительно заряженного мюона в феррояжидкости с 3% концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 в ZFC-эксперименте

Ранее, в нашей работе [S.I. Vorob'ev et al. Magnetochemistry, 7 (2021) 104] на μ SR-установке было исследовано различие магнитных свойства феррояжидкости с 3% наночастиц CoFe_2O_4 охлаждённых в магнитном поле (FC) и в нулевом магнитном поле (ZFC).

Наблюдаемые две частоты прецессии поляризации положительно заряженных мюонов (μ^+) соответствовали приложенному магнитному полю с поправкой плюс/минус $\sim h \leq 20$ Гс. Фазы прецессии в случае FC-измерений в пределах ошибок равны нулю, как и для ZFC-измерений при комнатной температуре (290 К) и ниже 150 К. Однако, **в диапазоне температур 150-250 К появляется отличная от нуля фаза, отрицательная для высокой частоты и положительная для низкой** (см. рисунок).

Надо отметить, что при обработке экспериментальных данных с фиксированной нулевой фазой величина остальных получаемых параметров не менялась (асимметрия, скорость деполяризации, частота).

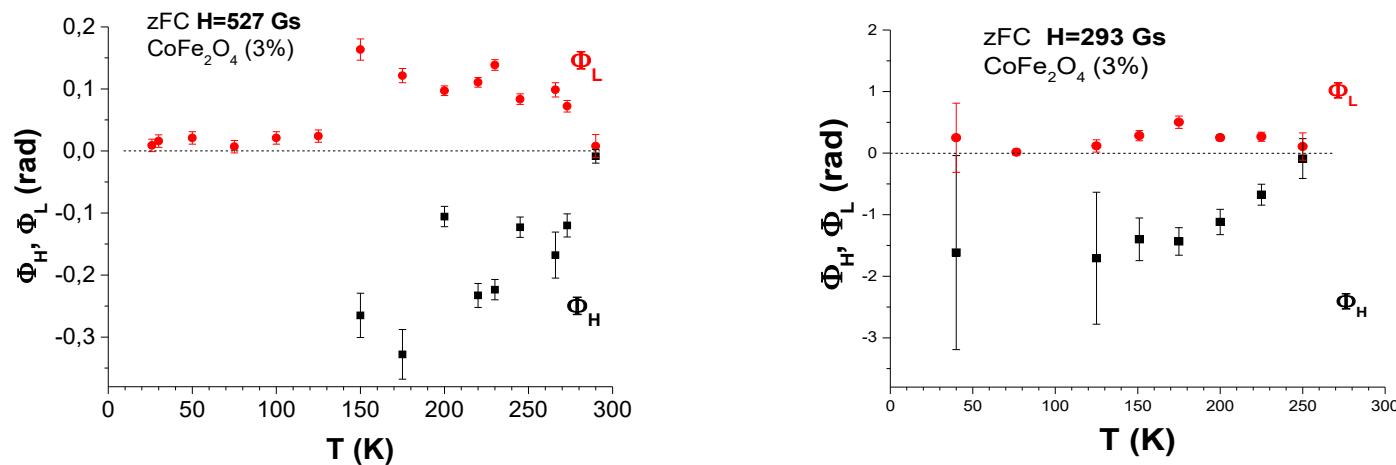


Рис. Температурная зависимость начальных фаз прецессии спина ансамбля мюонов в образце CoFe_2O_4 (3%) ZFC-измерение во внешнем магнитном поле $H=527$ Гс (левый) и $H=293$ Гс (правый); Φ_H – красные точки фаза низкой частоты, Φ_L – тёмные квадраты фаза высокой частоты.

В ZFC-эксперименте замораживаются изотропно направленные наночастицы. При температуре $T_b > 150$ К происходит разблокировка вращательных степеней свободы. Вслед за медленно вращающимися в двойном ПАВ наночастицами локальное поле на мюоне тоже вращается $H(t) = H + h(t)$.

За один полный оборот вектора магнитного поля спиновая функция приобретает фазу, пропорциональную телесному углу, который охватывает вектор (**фаза Берри**).

Эффекты геометрической фазы (фаза Берри) в нейтронной оптике подробно изложены в статье [В.И. Боднарчук и др. УФН 166(2) (1996) 185].



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
 ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
 Международная научная конференция

ACTUAL PROBLEMS OF
 SOLID STATE PHYSICS
 International Scientific Conference



СБОРНИК ТЕЗИСОВ
 BOOK OF ABSTRACTS

XI
 APSSP
 2025

ГО «Научно-практический центр
 Национальной академии наук
 Беларусь по материаловедению»
 Scientific-Practical Materials Research
 Centre of NAS of Belarus

Минск, Беларусь 2025



Institute of Nuclear Physics of
 Uzbekistan Academy of Sciences

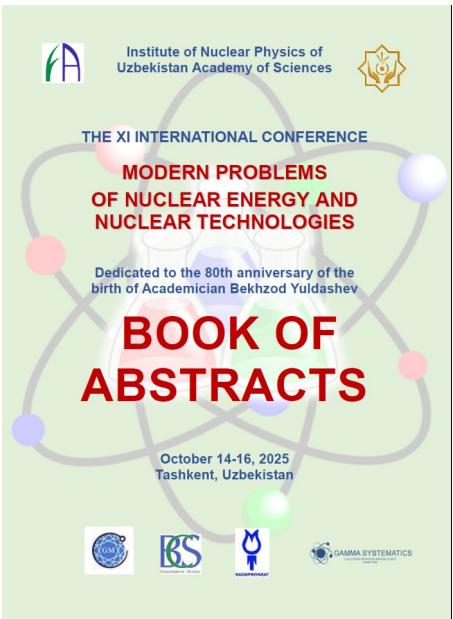


THE XI INTERNATIONAL CONFERENCE
 MODERN PROBLEMS
 OF NUCLEAR ENERGY AND
 NUCLEAR TECHNOLOGIES

Dedicated to the 80th anniversary of the
 birth of Academician Bekhzod Yuldashev

**BOOK OF
 ABSTRACTS**

October 14-16, 2025
 Tashkent, Uzbekistan



- Е.В. Виноградов, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Программа MNK2025A для обработки данных μ SR-эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663790 от 30.05.2025.*
- А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.В. Виноградов, В.С. Лобин, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Фаза прецессии положительно заряженного мюона в ферромагнетике с 3% концентрацией наночастиц $CoFe_2O_4$ в ZFC-эксперименте. Актуальные проблемы физики твердого тела [Электронный ресурс]: сб. тезисов. XI Междунар. науч. конф., Минск, 19–23 мая 2025 г. / ГО «НПЦ НАН Беларусь по материаловедению»; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск: ГО «НПЦ НАН Беларусь по материаловедению», 2025. С. 175.*
- С.И. Воробьев, Е.В. Виноградов, А.Л. Геталов, В.С. Лобин, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Применение μ SR-метода для исследования магнитных свойств вещества. Актуальные проблемы физики твердого тела [Электронный ресурс]: сб. тезисов. XI Междунар. науч. конф., Минск, 19–23 мая 2025 г. / ГО «НПЦ НАН Беларусь по материаловедению»; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск: ГО «НПЦ НАН Беларусь по материаловедению», 2025. С. 246.*
- Vorobyev S.I., Vinogradov E.V., Getalov A.L., Lobin V.S., Komarov E.N., Kotov S.A. *The μ SR-method application for studying the magnetic properties of a matter. Book of abstracts Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of Uzbekistan, The XI International Conference «Modern Problems of Nuclear Energy and Nuclear Technologies», October 14-16, 2025, Tashkent, Uzbekistan. Pp. 66-67.*





Интенсивность пучка с растяжкой



Интенсивность пучка без растяжки

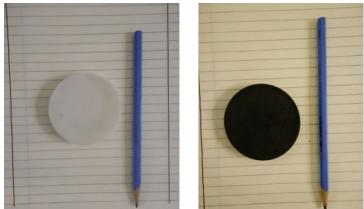


Нужно, чтобы снова стало так!



Интенсивность пучка
с растяжкой

Ждут «своего» ансамбля поляризованных мюонов



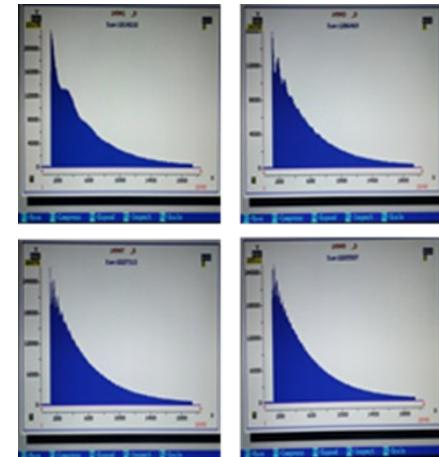
Исследования эластомеров с наночастицами CoFe_2O_4 : два набора образцов с концентрацией 0, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц CoFe_2O_4 .



μ SR-эксперименты по изучению магнитных свойств наноструктурных образцов:

- ❖ оксида меди CuO
- ❖ эндометаллофуллеренов $\text{C}_{60}@\text{Fe}$ (в перспективе и с редкоземельными ионами).

К настоящему моменту есть результаты измерения магнитной восприимчивости прекурсора FeC_x , а также образца эндометаллофуллерена $\text{Fe}@\text{C}_{60}$ в диапазоне температур 170К – 300К в нулевом магнитном поле.



μ SR-эксперименты по исследованию нано-ферригидрита бактериального происхождения. (Ядерный семинар ОФВЭ, 16.04.2024).

Ферригидрит – композиционный наноматериал с антиферромагнитным ядром и ферро(ферри)магнитной оболочкой с постоянным магнитным моментом.

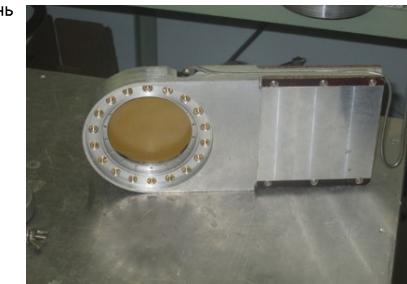
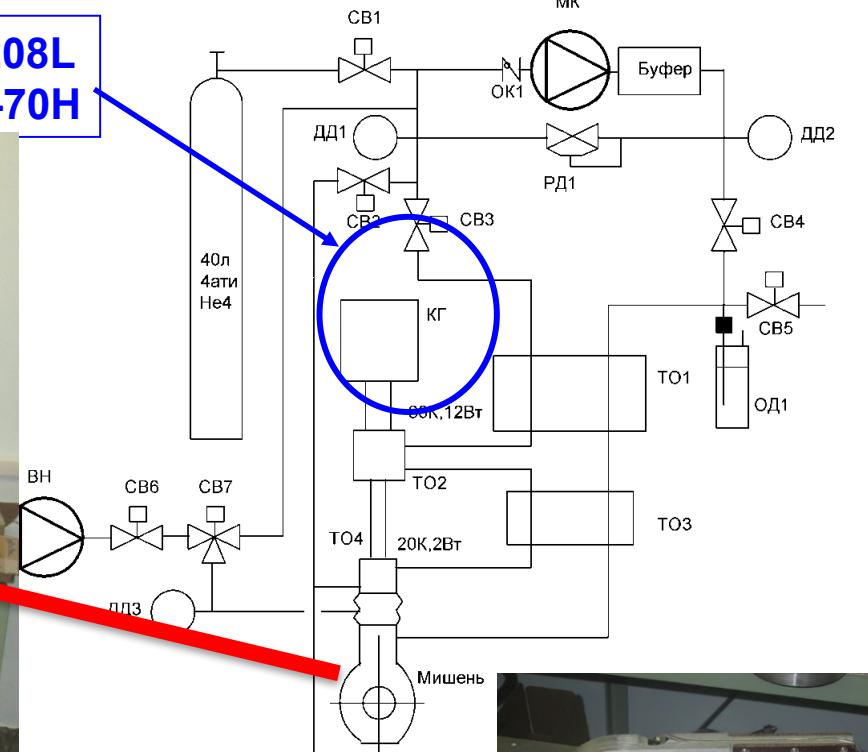
Интересно магнитное взаимодействие между суперпарамагнитными частицами на примере наночастиц ферригидрита (номинальная химическая формула $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O}$).

μ SR-исследование биоферригидрита будет весомым вкладом в комплексное изучение ферригидита, проводимое методами Мёссбауэровской спектроскопии, магнитометрии, с помощью электронного просвечивающего микроскопа.

Работы по криогенному оборудованию

Для чего нужно:

1. Изменять температуру исследуемых образцов в диапазоне 25 – 300 К;
2. Стабильно работать при высоких температурах (200 – 300 К);
3. Исключить потери гелия 20% (криогенная станция), так как позволит отказаться от использования сосуда Дьюара (без криогенной станции - 100%);
4. Экономия ускорительного времени (автономная работа- без захода в зал и смены дьюара).





Работы по криогенному оборудованию



Работы по криогенному оборудованию

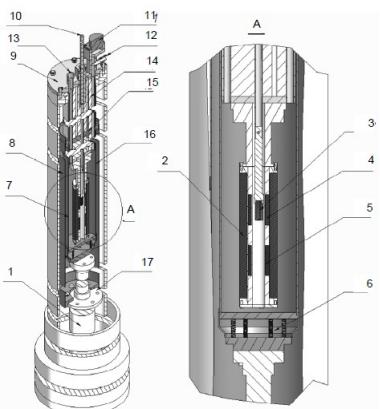
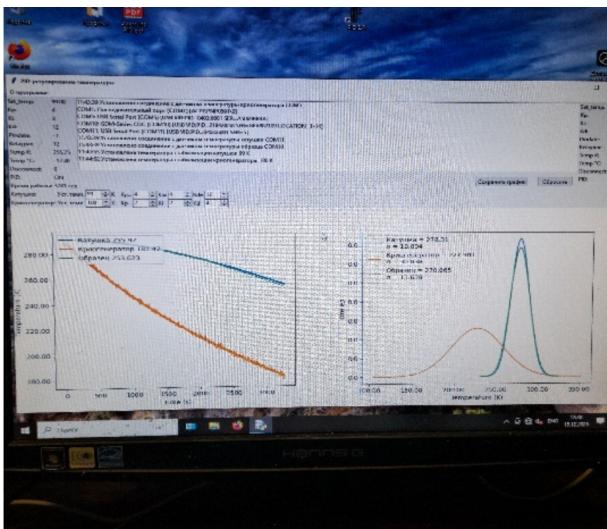


Рис. 2. Схема конструкции магнитометра: 1 – криогенатор; 2 – задающий соленоид; 3 – исследуемый образец; 4 – измерительный соленоид; 5 – опорный соленоид; 6 – вибрационная развязка; 7 – биметаллическая шахта криостата; 8 – вакуумная изоляция; 9 – верхний фланец криостата; 10 – держатель трансформатора взаимоиндукции; 11 – разъем для сигнальных проводов; 12, 13 – штуцеры для подвода и отвода хладагента; 14 – тепловая изоляция; 15 – тепловой перехват; 16 – экран для перехвата теплового излучения; 17 – первая ступень криогенатора



Установка по измерению магнитной восприимчивости

Управление температурой выведено на ПК.

Регистрируется температура рабочей головки криогенатора, температура гелиевой камеры с катушками и температура на образце.

Проведены фоновые измерения.

С Новым
Годом!

