

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 536.581.3

КОМПАКТНЫЙ АВТОНОМНЫЙ РЕФРИЖЕРАТОР ДЛЯ РАБОТЫ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 0.35 К

©2025 г. А. Д. Голованова^{a,b}, А. М. Трояновский^{a,b,*}

^aНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”

Россия, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

^bИнститут физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук

Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

**e-mail: amt23@list.ru*

Поступила в редакцию 27.05.2025 г.

После доработки 19.06.2025 г.

Принята к публикации 01.07.2025 г.

Описан компактный автономный криостат, работающий на основе криорефрижератора Гиффорда–МакМагона замкнутого цикла промышленного производства с рабочей температурой до 0.35 К. Криостат не имеет внешних насосов и других коммуникаций за исключением необходимого для работы компрессора криорефрижератора. Рабочая температура обеспечивается сорбционной откачкой паров изотопов ^4He и ^3He . Необходимый запас газа постоянно находится внутри криостата. Высота корпуса криостата составляет 600 мм, диаметр корпуса равен 250 мм. Время конденсации газов – менее 1 ч, продолжительность непрерывной работы – до 12 ч (она зависит от мощности, выделяемой на холодной ступени).

1. ВВЕДЕНИЕ

Для получения температуры до 0.3 К обычно используются криостаты с изотопом ^3He . Известно много конструкций криостатов с откачкой паров ^3He , выполненных в виде вставок, погружаемых в жидкий гелий, либо в виде установок, требующих заливки жидких гелия и азота [1]. Устройство криогенной системы, базирующей на автономном рефрижераторе замкнутого цикла, отличается от конструкций, использующих криогенные жидкости. Известна конструкция криостата растворения с рабочей температурой 0.1 К, созданная в ИФП РАН без использования внешнего оборудования [2]. Этот прибор имеет дополнительный объем гелия для конденсации. Затем сконденсированный объем гелия используется для работы криостата растворения при выключенном компрессоре. Такая

сложная схема необходима для минимизации вибраций, создаваемых криорефрижератором. Вибрации оказывают влияние как на работу криостата растворения, так и на чувствительные датчики, для работы которых создавался криостат. Однако есть круг задач, которые не требуют столь низких температур и устранения всех вибраций в системе. В представленной работе была поставлена задача разработать максимально простую в использовании криогенную систему с рабочей температурой до 0.35 К без внешнего откачного оборудования. Разработанная система базируется на двухступенчатом криорефрижераторе с циклом Гиффорда–МакМагона типа HE-412D производства НунНе (КНР) [3], имеющем холодопроизводительность 1.25 Вт при температуре 4.2 К.

При небольшой тепловой нагрузке такой криорефрижератор обеспечивает температуру первой ступени менее 30 К (до 25 К) и второй ступени менее 3 К (до 2.5 К). Температура критической точки изотопа ^3He составляет 3.3 К, что позволяет напрямую получать жидкий ^3He . Давление паров ^3He при температуре 2.5 К составляет 444 мбар. Практика работы с криогенными системами показала, что для эффективной отдачи сорбционного насоса (в режиме регенерации) его надо нагревать примерно до температуры 40 К. При этом при переходе в режим откачки с помощью его охлаждения второй ступенью криорефрижератора теплопотребление сорбционного насоса таково, что на некоторое время (несколько минут) температура второй ступени повышается до 4 К или даже немного выше. В нашей конструкции для создания оптимальных условий конденсации ^3He мы использовали дополнительный контур с ^4He . Контур с ^4He охлаждает рабочую ступень примерно до температуры 0.9 К и обеспечивает конденсацию ^3He при этой температуре. Такая схема позволяет эффективно использовать ^3He для охлаждения оборудования от температуры его конденсации, равной примерно 0.9 К (давление паров 6.7 мбар), до минимальной, в нашем случае менее 0.35 К.

2. КОНСТРУКЦИЯ КРИОСТАТА

Весь запас гелия, необходимый для работы системы, находится внутри криостата: в балластных объемах, в объеме насосов, в камерах и соединительных линиях. Подобные системы известны и использовались в заливных криостатах [1, 4]. В нашей конструкции балластные объемы размером $\varnothing 55 \times 107 \text{ мм}^2$ предназначены для уменьшения давления газообразных ^3He и ^4He . Балластные объемы рассчитаны на давление внутри системы не более 16 бар при комнатной температуре (при неработающем криостате). Исходя из этой величины максимального давления, выполнены все элементы и соединения для магистралей гелия, после сборки система проверялась на прочность давлением 25 бар. Проведенные

расчеты показали, что при заправке каждого контура четырьмя литрами газообразного гелия (при нормальных условиях) сконденсируется жидкий ^4He объемом 6 см³ и жидкий ^3He объемом 7 см³.

На рис. 1 приведена схема криостата с автономным рефрижератором. Внутри криостата для обеспечения работы двух контуров (^4He и ^3He) предусмотрены два одинаковых сорбционных насоса. Основные компоненты системы включают верхний фланец, криорефрижератор 1, отдельные (балластные) объемы 2, 3 для газообразного и жидкого ^4He и ^3He , угольные сорбционные насосы для откачки паров жидкого гелия 4, 5, ванну конденсации ^4He 8, конденсор ^3He 9 и ванну для жидкого ^3He 11. Верхний теплый фланец криостата представляет собой обычный фланец ISO250, который крепится к корпусу криостата стандартными трубами. К верхнему фланцу винтами закреплен криорефрижератор, к которому крепятся все необходимые детали конструкции, за исключением балластных объемов.

Рис. 1. Общая конструкция криостата.

Промежуточные объемы 6 и 7 предназначены для предварительного охлаждения газообразного гелия, они соединены между собой и со второй ступенью медным хладопроводом. Ванна для жидкого ^4He 8 и конденсор ^3He 9 также соединены между собой медной пластиной-мостиком. Пластины второй ступени, пластина третьей ступени (0.35 K) и хладопроводы изготовлены из бескислородной меди с высокой теплопроводностью. Все емкости соединены между собой трубками из нержавеющей стали диаметром 6 мм с толщиной стенок 0.2 мм. Медные газовые емкости имеют толщину крышек 3 мм, толщину боковых стенок – 2 мм, что достаточно, чтобы выдержать давление внутри до 25 бар. Камера-ванна для ^3He 11 выполнена из меди, она имеет внутри ребристую поверхность для увеличения площади соприкосновения с жидким ^3He , большинство соединений выполнено пайкой серебряным припоем в вакуумной печи. Часть паяк выполнена оловянным и индиевым припоями.

Сорбционные насосы сделаны одинаково в виде двух сварных соосных цилиндров, часть их внутренних объемов заполнена гранулами активированного угля. Схема сорбера представлена на рис. 2. Сорбер состоит из внешнего медного корпуса 1 размером $\varnothing 46 \times 104$ мм², который соединен медным хладопроводом 15 (рис. 1) со второй ступенью, промежуточного корпуса 2 и внутреннего медного корпуса, соединенного медной трубкой с основанием сорбера. Между внутренним 4 и промежуточным 3 корпусами насыпаны гранулы активированного угля, газообмен происходит через отверстия, сделанные во внутреннем корпусе. Поверх медной внутренней трубки, соединенной с внутренним

корпусом сорбера, намотан электрический нагреватель 6 сопротивлением 100 Ом. Внутренний объем сорбера отделен от внешнего корпуса теплоизолирующим объемом, который выполняет функцию газового теплового ключа. Этот объем сорбера соединен тонкой трубочкой с небольшим дополнительным сорбером 5 с термометром-нагревателем, за счет чего можно управлять тепловым ключом. Нагревая дополнительный сорбер, можно менять давление газа в промежуточном объеме, таким образом, либо охлаждая основной сорбер, соединяя его по теплу с внешним корпусом, либо теплоизолируя его от внешнего корпуса. Масса угля в основном сорбере составляет 16.5 г, в маленьком равна 0.2 г.

Рис. 2. Конструкция сорбера.

Для предварительного быстрого охлаждения третьей ступени в процессе охлаждения она соединяется с помощью электромагнитного теплового ключа 10 (рис. 1) со второй ступенью. В конструкции электромагнитного ключа используется постоянный магнит, закрепленный на стержне-оси. На цилиндрические части по бокам от магнита намотаны катушки, каждая сопротивлением 22 Ом. Катушки подключены параллельно, таким образом, общее сопротивление цепи около 11 Ом (при комнатной температуре). Для срабатывания ключа на обмотку подается импульс тока величиной примерно 4 А (используется разряд конденсатора), в зависимости от полярности импульса стержень-ось ключа перемещается либо в одно, либо в другое крайнее положение. К стержню прикреплен медная позолоченная пластина, которая, прижимаясь ко второй ступени, зажимает хладопровод, соединенный с третьей ступенью и, таким образом, осуществляет необходимый тепловой контакт. Питание ключа необходимо только в момент переключения.

Нижняя пластина третьей ступени закреплена с помощью трех стоек – тепловых мостов 16 (рис. 1) и трубки откачки ^3He . Каждая стойка имеет коаксиальную конструкцию, состоящую из двух тонкостенных трубок из нержавеющей стали, скрепленных с одной стороны. К нижней пластине стойки закреплены винтами через теплоизолирующие прокладки. Такие три стойки обеспечивают достаточную жесткость конструкции при минимальных паразитных тепловых потоках.

Для теплоизоляции системы использовалось несколько тепловых экранов, сделанных из меди. Экран первой ступени – медный отполированный цилиндр, сваренный из листа, с припаянным дном и соединительным фланцем, он крепится к первой ступени болтами и представляет собой легкоъемную деталь. Наружная часть экрана обмотана суперизоляцией, внутренняя поверхность обклеена алюминизированной самоклеящейся пленкой. Функция этого экрана – закрывать от теплового излучения внешнего корпуса внутреннюю часть криостата. Экран второй ступени закрывает третью ступень, он также представляет собой

медный отполированный цилиндр, свернутый из листа, с припаянным медным дном. Он также крепится к пластине второй ступени болтами и легко может быть демонтирован для смены образцов. Для защиты от окисления медный экран второй ступени покрыт золотой пленкой химическим методом. Также над второй ступенью расположен разрезной медный экран, который закрывает камеры конденсации гелия от теплового излучения первой ступени, он может быть легко демонтирован для доступа к компонентам криостата.

Для обеспечения высокого вакуума во время работы криостата и поглощения остаточных газов на второй ступени закреплена небольшая медная пластина с приклеенным активированным углем. Для контроля заполнения и наличия газов ^3He и ^4He в системе на верхнем фланце установлены два манометра, а также вентили и запорочный фланец типа KF-16. Контур ^4He заполняется гелием высокой чистоты при комнатной температуре до давления 16 бар, контур ^3He заполняется в холодном состоянии дозированным количеством газа.

Для контроля работы криостата используется 7 термометров. Температура первой ступени контролируется платиновым термометром, температура второй ступени и основных сорберов – диодными калиброванными датчиками, на камере конденсации гелия и на нижней ступени расположены калиброванные термометры сопротивления RuO_2 величиной 1 кОм (при температуре 273 К). Их сопротивление измерялось высокочувствительным мостом переменного тока фирмы LakeShore. Для избежания перегрева термометра на ступени с температурой 0.35 К электрические соединения между термометром и точкой теплового контакта со второй ступенью выполнены из сверхпроводящего провода диаметром 0.05 мм. На каждом из маленьких сорберов закреплено по одному рутениевому сопротивлению величиной 10 кОм (при 273 К), эти сопротивления можно использовать либо для измерения температуры, либо в качестве нагревателей, пропуская через них ток. Их сопротивление измерялось обычным мультиметром. Для уменьшения количества проводов сопротивления величиной 10 кОм подключены по однопроводной схеме (второй провод – корпус криостата), диодные датчики подключены по двухпроводной схеме, такая упрощенная схема практически не влияет на точность измерений, но уменьшает количество проводов. Для работы всех нагревателей используется один источник напряжения величиной 8 В с максимальным током 200 мА. Управление электромагнитным тепловым ключом осуществляется отдельным небольшим блоком, который обеспечивает заряд конденсатора 2200 мкФ до напряжения 35 В, с последующим разрядом через электромагнитный ключ с помощью полупроводникового реле по сигналу от ТТЛ-входа. Управление криостатом легко автоматизируется с использованием операционных усилителей и промышленного блока АЦП–ЦАП с выходным регистром (для управления электромагнитным тепловым ключом).

Небольшая скорость тепловых процессов позволяет использовать для программного управления криостатом систему LabView.

3. РАБОТА КРИОСТАТА

После сборки криостата газ из внутреннего объема откачивается форвакуумным насосом до давления около 0.01 мбар. В исходном состоянии электромагнитный тепловой ключ должен быть в замкнутом состоянии, все нагреватели должны быть выключены. Запускается криорефрижератор, и примерно через 1 ч температура первой ступени становится меньше 30 К, после этого начинает активнее работать вторая ступень. Для охлаждения всех частей криостата до рабочего режима требуется до 12 ч. Охлаждение ступени с температурой 0.35 К происходит в следующей последовательности (циклограмма представлена на рис. 3). Сначала включается нагрев сорбера ^4He , время нагрева составляет примерно 25 мин, после достижения температуры 40 К (точка 1 на циклограмме) большая часть газа десорбируется, газ ^4He конденсируется в ванну 8 (рис. 1). Нагрев сорбера ^4He выключается и включается нагрев сорбера ^3He (точка 2). Возможно одновременное включение нагрева двух сорберов. После нагрева сорбера ^3He до температуры 40 К включается нагрев малого сорбера теплового ключа линии ^4He (точка 3), после некоторого времени начинается охлаждение сорбера и, соответственно, начинается откачка ^4He . В системе начинается процесс конденсации ^3He в камере конденсации 9, которая тепловым мостиком связана с камерой конденсации ^4He 8. Жидкий ^3He по мере конденсации стекает в камеру 11 для жидкого ^3He на ступени с температурой 0.35 К. Для охлаждения этой ступени перед началом процесса размыкается электромагнитный тепловой ключ, таким образом, нижняя ступень получается отвязанной по теплу от второй ступени. Включается нагрев малого сорбера теплового ключа контура ^3He (точка 4) и начинается понижение температуры жидкого ^3He . Кратковременное (примерно на 10 мин) понижение температуры камеры конденсации ^4He до 0.6 К (точка 5) связано с небольшим остаточным количеством ^3He в камере конденсации из-за специфической формы дна этой камеры. В дальнейшем устанавливаются температура камеры конденсации ^4He на уровне примерно 0.9 К и температура третьей ступени менее 0.35 К (точка 6). Минимальная температура зависит от тепловой нагрузки. Через некоторое время (на циклограмме примерно через 2 ч) ^4He в камере конденсации полностью откачивается (точка 7), и ее температура повышается примерно до 2.6 К. При этом немного повышается температура нижней ступени (из-за увеличения потока тепла от камеры конденсации). При этом без дополнительной тепловой нагрузки температура нижней ступени держится на уровне около 0.35 К. Минимальная

температура достигается при минимальной температуре сорбера, в работе температура сорберов опускалась примерно до 4 К. Время цикла зависит от тепловой нагрузки; без дополнительной нагрузки газообразного ^3He объемом 1 л хватает примерно на 8 ч непрерывной работы криостата.

Рис. 3. Циклограмма работы криостата.

Температура ступени 0.35 К зависит от скорости откачки и в диапазоне от 0.35 до 1 К (или немного выше) может регулироваться температурой сорбера. Минимальная температура зависит от мощности, выделяемой полезной нагрузкой. На рис. 4 приведена зависимость температуры третьей ступени от рассеиваемой на ней мощности. Отметим, что увеличение мощности приводит не только к повышению температуры ступени, но и к сокращению времени непрерывной работы. Повышение мощности приводит также к некоторому уменьшению температуры камеры конденсации 9 (рис.1) вследствие увеличения потока паров ^3He , что уменьшает поток тепла по трубке откачки.

Рис. 4. Зависимость температуры третьей ступени от рассеиваемой на ней полезной мощности.

Следует заметить, что минимальная температура может быть уменьшена до величины менее 0.3 К, эта величина зависит от скорости откачки паров ^3He . В данной конструкции она ограничена диаметром откачной магистрали, этот диаметр может быть увеличен до 8–9 мм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен криостат на базе промышленного автономного двухступенчатого криорефрижератора, работающего по циклу Гиффорда–МакМагона, с минимальной температурой 0.35 К, не требующий заливки криогенных жидкостей. Криостат построен по принципу откачки паров изотопа ^3He в циклическом режиме. Все коммуникации и насосы, необходимые для работы криостата, находятся внутри корпуса криостата. Снаружи расположены только коммуникации с компрессором, необходимые для работы криорефрижератора, и измерительная аппаратура. Откачка паров изотопов ^4He и ^3He , необходимых для работы криостата, осуществляется сорбционными угольными насосами, расположенными внутри криостата. Необходимый запас газов ^3He и ^4He постоянно находится внутри криостата, в “теплом” режиме давление в магистралях может достигать до 16 бар. Время выхода на рабочий режим при охлаждении от комнатной температуры – около 12 ч. Начало цикла, охлаждение до минимальной температуры занимает около 1 ч. Время нахождения при минимальной температуре зависит от полезной нагрузки, оно может

доходить до 16 ч (в зависимости от количества заправленного в криостат изотопа ^3He).
Работа выполнена в ИФП РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

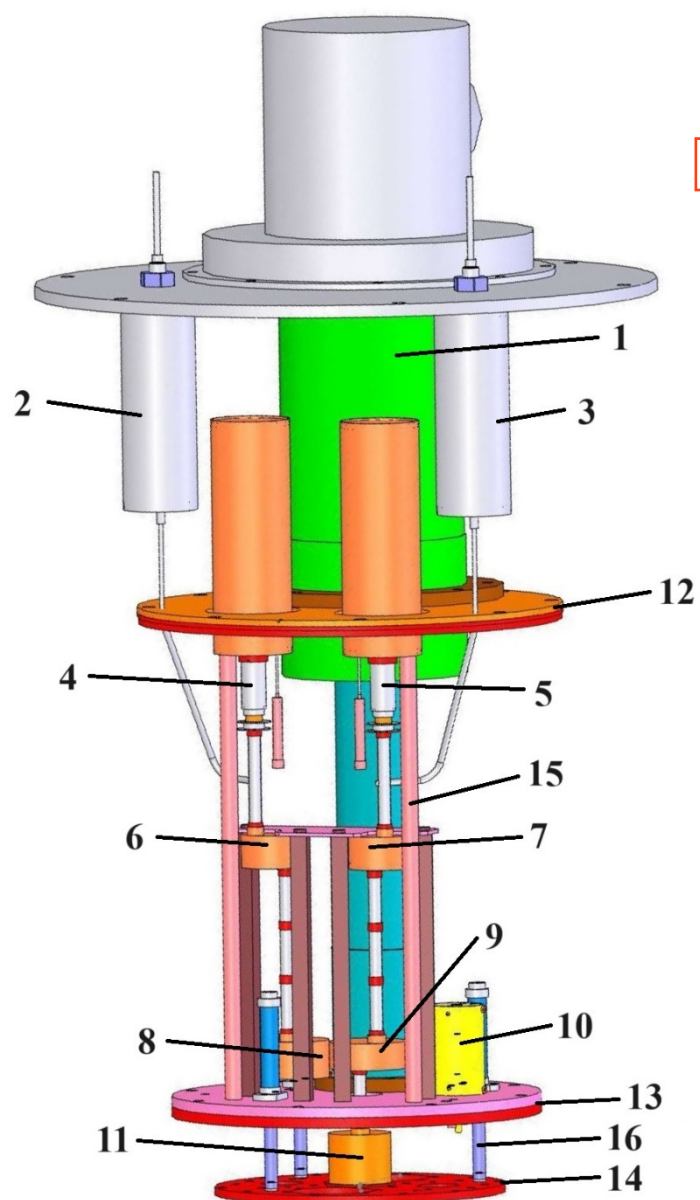
Авторы выражают благодарность В.С. Эдельману за консультацию и множественные ценные и полезные советы. Авторы признательны сотрудникам механической мастерской ИФП РАН за высококачественное изготовление деталей и сборку криостата. Особенно стоит отметить вклад В.Е. Трофимова, работа которого по изготовлению и пайке деталей обеспечила успешное выполнение проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трофимов В.Н., Черников А.Н.* // ПТЭ. 2003. Т. 46. № 4. С. 157.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17308369>
2. *Марухно А.С., Эдельман В.С.* // ПТЭ. 2024. № 5. С. 207.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=80453886> .
3. www.hynhe.com
4. *Walton D., Timusk T., Sievers A.J.* // Rev. Sci. Instrum. 1971. V. 42. P. 1265.
<https://doi.org/10.1063/1.1685364>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общая конструкция криостата: 1 – криорефрижератор, 2 – объем ^4He , 3 – объем ^3He , 4 – сорбционный насос для откачки паров ^4He , 5 – сорбционный насос для откачки паров ^4He , 6 и 7 – промежуточные объемы для газообразных ^4He и ^3He , 8 – ванна для конденсации ^4He , 9 – конденсор ^3He , 10 – электромагнитный тепловой ключ, 11 – ванна для ^3He , 12 – пластина первой ступени (30K), 13 – пластина второй ступени (~ 2.5 K), 14 – пластина третьей ступени (0.35 K), 15 – хладопроводы, 16 – подвеска третьей ступени.
- Рис. 2.** Конструкция сорбера: 1 – медный внешний корпус, 2 – промежуточный корпус из нержавеющей стали, 3 – активированный уголь, 4 – внутренний медный корпус с отверстиями, 5 – малый адсорбер, заполненный углем, 6 – электрический нагреватель.
- Рис. 3.** Циклограмма работы криостата: сплошная кривая – температура третьей ступени 0.35K, штриховая кривая – температура камеры конденсации ^4He , штрихпунктир – температура сорбера ^4He , пунктир – температура сорбера ^3He , цифрами обозначены ключевые точки циклограммы (см. текст).
- Рис. 4.** Зависимость температуры третьей ступени от рассеиваемой на ней полезной мощности.



цифры – курсив

Рис. 1.

цифры – курсив

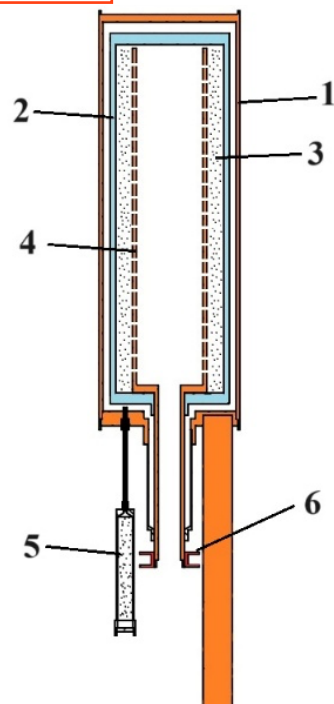


Рис. 2.

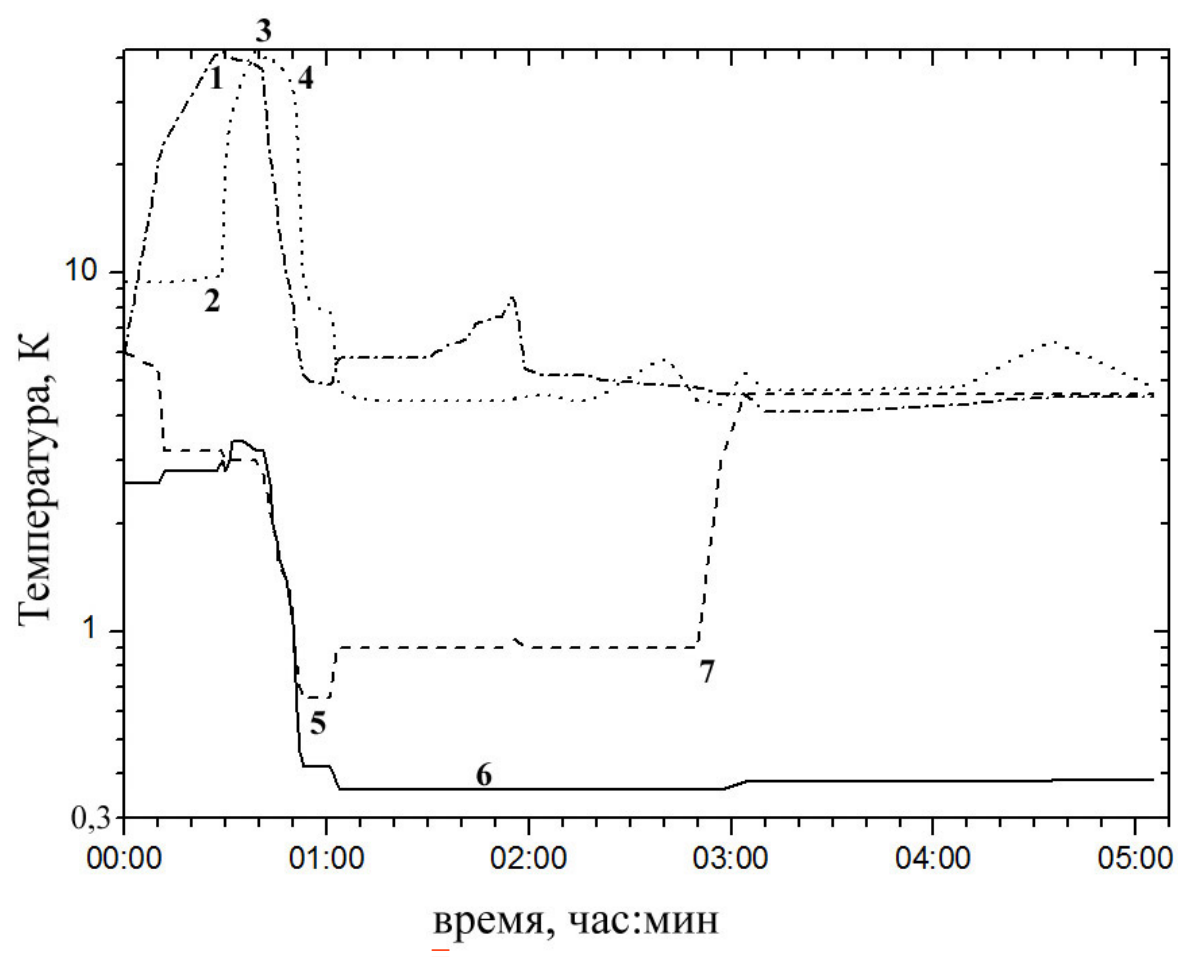


Рис. 3.

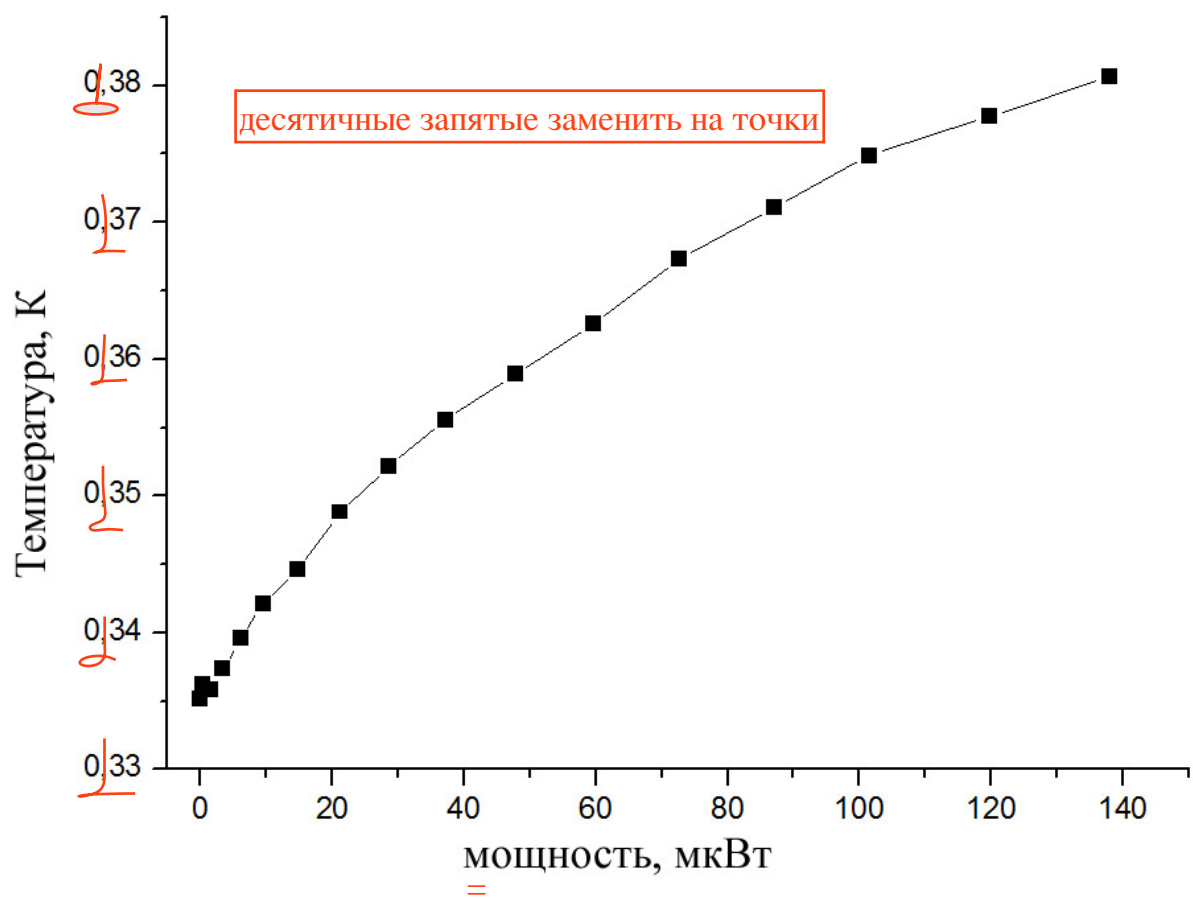


Рис. 4.