

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.385

**ФОТОПОЛИМЕРНАЯ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА ДЛЯ
ГИРОТРОНОВ НИЗКОГО УРОВНЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ**

©2026 г. А. В. Кирсанов^{a,b,*}, М. Д. Проявин^a, А. А. Орловский^{a,c},
В. Е. Котомина^a, А. А. Ананичев^a

^a *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

^b *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603022, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23*

^c *Волжский государственный университет водного транспорта
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а*

*E-mail: alexkirs@ipfran.ru

Поступила в редакцию 05.02.2026

После доработки 07.05.2026

Принята к публикации 15.05.2026

Для измерения мощности гиротронов миллиметрового диапазона предложена, разработана и экспериментально исследована конструкция проточного водяного калориметра, в котором составные части (корпус, волноводная вставка и крышка) изготовлены методом фотополимерной 3D-печати из пластика с применением технологии последующего омеднения (CMPS). Поскольку теплопроводность пластика на три порядка ниже, чем у традиционно используемых металлов, выход такого калориметра на стационарный режим (как в процессе калибровки, так и в процессе проведения измерений СВЧ-мощности) происходит в несколько раз быстрее. В результате минимизируется влияние временных уходов температуры поступающей воды, а также температуры окружающего воздуха, что позволяет повысить точность проводимых измерений. Последнее обстоятельство особенно важно для измерения мощности импульсных гиротронов с низкой средней мощностью.

Ключевые слова: гиротроны, калориметр, измерение мощности СВЧ-излучения

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки гиротронов, являющихся наиболее мощными (от киловаттного и вплоть до мегаваттного уровня) источниками миллиметрового диапазона, обусловлена широким спектром их приложений. В основном для приложений требуется непрерывное квазимонохроматическое излучение. В то же время для экспериментального тестирования гиротронов-прототипов, а также новых принципов повышения частоты и мощности зачастую используется импульсный режим работы этих приборов (см., например, работы [1–3]), что облегчает условия проведения экспериментов. При этом одной из

важнейших выходных характеристик гиротронов является мощность генерируемого СВЧ-излучения. Существует много вариантов исполнения калориметров [4–9], однако для измерения мощности как непрерывных, так и импульсных гиротронов обычно используются калориметры проточного типа [4], в которых в качестве поглощающей среды выступает дистиллированная вода со сравнительно малой (несколько десятков микрон в миллиметровом диапазоне) толщиной скин-слоя. Вследствие этого СВЧ-излучение практически полностью поглощается, нагревая воду. Мощность излучения определяется по разнице температур входного и выходного потоков воды, а также по ее расходу.

Традиционно корпуса калориметров изготавливаются из металлов. Однако существенными недостатками таких систем являются большие теплотери из-за высокой теплопроводности металла и, как следствие, долгий выход калориметрической нагрузки на стационарное состояние, в котором и проводятся измерения мощности. Кроме того, температурные условия проведения эксперимента (температура входной воды, теплообмен с внешней средой и т.д.) за время выхода на стационарный режим могут существенно изменяться, из-за чего могут возникать значительные погрешности измерений. Особенно сильно это проявляется при измерениях мощности импульсных гиротронов с высокой скважностью и низкой средней энергией (на уровне единиц джоулей). В этой связи перспективным представляется изготовление корпусов калориметров из полимерных материалов с низкой теплопроводностью. В то же время механическая обработка сравнительно крупногабаритных изделий из полимеров является достаточно трудоемкой задачей.

В связи с изложенным выше был предложен и апробирован достаточно простой и эффективный способ изготовления корпуса калориметров миллиметрового диапазона на основе технологии 3D-печати из фотополимерного материала, теплопроводность которого на несколько порядков (в 1000 раз) ниже, чем у обычно используемых сплавов на основе алюминия. На этой основе был реализован калориметр, предназначенный для экспериментов с импульсным (длительность импульса 50 мкс) гиротроном-драйвером [2] с рабочей частотой 230 ГГц, предназначенным для экспериментов по захвату мегаваттного гиротрона того же частотного диапазона. Проведено экспериментальное тестирование разработанного калориметра, а также сравнение времени выхода на стационарную температуру при калибровке традиционного металлического калориметра и калориметра из пластика. В настоящей работе подробно описаны дизайн разработанной калориметрической нагрузки и результаты экспериментов.

2. ДИЗАЙН КАЛОРИМЕТРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Выходное излучение мощных гиротронов миллиметрового диапазона частот обычно

поступает в калориметрическую нагрузку с распределением, близким к гауссовому пучку, и горизонтальной линейной поляризацией. Для транспортировки волнового пучка до поглощающей среды внутри калориметра должна быть создана проводящая поверхность. В настоящее время существует несколько технологий изготовления проводящих структур на основе 3D-печати, включая непосредственную печать из металлических порошков. Однако этот метод достаточно дорогой, особенно в случае печати медью, и он не позволяет обеспечить качество поверхности, требуемое для высокочастотных (десятки и сотни ГГц) диапазонов. Указанных недостатков лишен альтернативный метод изготовления проводящих СВЧ-компонентов, использующий печать из фотоотверждающегося пластика (смолы) с последующей металлизацией (омеднением) поверхности CMPS [10, 11]. Описанный метод применялся для изготовления полимерного калориметра с использованием фотоотверждающейся смолы Gorky Liquid Reactive.

Трехмерная модель разработанного калориметра представлена на рис. 1а.

Рис. 1. Разработанная 3D-модель калориметра с входным волноводом диаметром 80 мм...

В целом эта модель близка по параметрам к традиционным измерителям мощности гиротронов, изготавливаемым из металлов. Фланец корпуса калориметра присоединяется к выходному фланцу гиротрона. Диаметр входного волновода составил 80 мм. Волноводом является специальная омедненная вставка 1, показанная на рис. 1а. В процессе ее изготовления на внутренней поверхности калориметра был наращен слой меди толщиной 0.1–0.15 мм. Следует отметить, что, в отличие от нержавеющей стали, которая, в основном, используется в качестве материала для калориметров, медная поверхность практически без потерь и, соответственно, без нагрева проводит СВЧ-излучение в область его поглощения в водяном канале. Поскольку тонкий слой меди окружен диэлектрическим корпусом, дополнительные тепловые потери (теплообмен с окружающей средой) в нем отсутствуют. Между волноводной вставкой с корпусом и крышкой с водяными патрубками была расположена пластина из фторопласта ФТ-4 толщиной 0.2 мм, отделяющая поглощающую СВЧ-излучение воду от пространства волновода. Изготовленные и подготовленные к сборке составные части калориметрической нагрузки (волноводная вставка, крышка и корпус) показаны на рис. 1б.

После изготовления деталей и сборки было проведено экспериментальное тестирование разработанного калориметра с целью его калибровки, а также для сравнения времени выхода на стационарную температуру с таковым у традиционного калориметра, выполненного из алюминия.

3. СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проводились по схеме, представленной на рис. 2. В измерительный водяной контур калориметра 1 входят водяной насос 2, внутренний малый теплообменник 3,

регулятор протока 4, входной термодатчик 5, калибровочный нагреватель 6 и термодатчик 7 выходной температуры. Поскольку постоянно работающее оборудование постепенно нагревается само и греет все в помещении вокруг, необходим внешний контур охлаждения, образованный водяным насосом 9 и теплообменниками 3 и 10. Данные от термодатчиков поступают в систему управления стендом 8. Расход воды выставлялся специальным регулятором и контролировался расходомером с записью всех параметров установки в специальный файл.

Рис. 2. Схема “водяной” части эксперимента

Приведенная схема использовалась для калибровки разработанного фотополимерного калориметра, а также для сравнения его характеристик с характеристиками стандартного калориметра, изготовленного из алюминия. Результаты такого сравнения представлены на рис. 3, 4. При калибровке СВЧ-мощность через волновод 11 не подавалась.

Рис. 3. Временные зависимости измеренной мощности при калибровке двух разных калориметров

На рис. 3 приведены временные зависимости измеренной мощности фотополимерного и алюминиевого калориметров. Для более заметного различия при измерениях выставлялись разные значения протока воды при одинаковых мощностях нагревателя калибровки. Результаты измерений фиксировались только после выхода системы на стационарное состояние. Видно, что время выхода на стационарный режим для алюминиевого калориметра (кривая 1) составляет примерно 5–7 минут, тогда как для полимерного калориметра (кривая 2) это время существенно меньше (не превышает 1–1.5 мин). При такой разнице значений времени выхода на стационарное состояние снижается влияние изменений внешних параметров, таких как температура или напряжение в электрической сети.

Рис. 4. Временные зависимости измеренной мощности при включении на 3 мин вентилятора рядом с металлическим калориметром (кривая 1) и фотополимерным калориметром (кривая 2)

Это непосредственно подтверждено в дополнительном эксперименте, в котором рядом с калориметрами на 3 мин включался вентилятор. Временные зависимости измеряемой мощности в этом случае для исследуемых калориметров двух типов представлены на рис. 4. Видно, что включение вентилятора рядом с металлическим калориметром (точка А на кривой 1) приводило к увеличению показаний почти на 20%; показания восстанавливались только после выключения вентилятора (точка В на кривой 1). Такая сравнительно высокая разница была обусловлена существенной разницей температур в лаборатории (25 °С) и поступающей оборотной воды (19 °С). В то же время для фотополимерного калориметра изменение температуры окружающего воздуха не оказывало влияния на проводимые измерения (кривая 2), поскольку сравнительно низкая теплопроводность полностью изолирует

теплоноситель.

После калибровки разработанный фотополимерный калориметр был использован для непосредственного измерения мощности гиротрона-драйвера [2] с рабочей частотой 230 ГГц, длительностью импульса 50 мкс и скважностью 2000. Согласно расчетам, выходная СВЧ-мощность такого гиротрона может достигать 150 кВт. Эксперименты также проводились по схеме, представленной на рис. 2: в этом случае мощность от гиротрона-драйвера поступала через входной волновод 11. Калибровочный нагреватель 6 был выключен. Результаты экспериментальных измерений представлены на рис. 5, где на рис. 5а показаны временные зависимости температуры входной (кривая 1) и выходной воды (кривая 2), а на рис. 5б – восстановленная по результатам измерения зависимость СВЧ-мощности от времени. Согласно измерениям, мощность гиротрона-драйвера превышала 100 кВт. Полученные данные показали, что разработанный драйвер пригоден для экспериментов по захвату частоты мегаваттного гиротрона того же частотного диапазона.

Рис. 5. Временные зависимости: а – температуры входной (кривая 1) и выходной воды (кривая 2); б – СВЧ-мощности, восстановленной по результатам измерения.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, в целом проведенные исследования показали перспективность изготовления калориметрических нагрузок для гиротронов малой и средней мощности методом фотополимерной 3D-печати с последующим омеднением отдельных элементов. Была полностью подтверждена правильность заложенных предположений о возможных преимуществах разработанной технологии изготовления, включая высокую скорость измерений и отсутствие зависимости полученных данных от внешних условий.

В то же время эксплуатация разработанного фотополимерного калориметра выявила ряд недостатков. В частности, платой за полученные преимущества, обусловленные низкой теплопроводностью пластика по сравнению с металлами, являются сниженные прочностные характеристики фотополимерных изделий из пластика. Низкая прочность и хрупкость пластмассы могут приводить (и приводили) к водяным протечкам и поломкам. Тем не менее проектирование, изготовление и тестирование фотополимерного калориметра для гиротрона-драйвера позволили набрать существенный опыт работы по изготовлению объемных деталей по 3D-моделям. В частности, было выявлено, что направление 3D-печати и величина термической усадки прецизионно стыкуемых деталей должны строго учитываться. Это вводит ограничения на размер изготавливаемых деталей, но может быть учтено при проектировании. Кроме того, проблемы с прочностью могут быть решены при использовании более прочного пластика. На данный момент ясно, что исправление обнаруженных недостатков позволит изготавливать надежные калориметры для гиротронов, в том числе и с мегаваттной

мощностью излучения в единичных импульсах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Института прикладной физики РАН в рамках проекта “Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР-диапазона” (FFUF-2022–0007)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ananichev A.A., Fokin A.P., Kuftin A.N. et al.* IEEE Electron Device Lett. 2025. V. 46. № 11. P. 2142. <https://doi.org/10.1109/LED.2025.3604060>.
2. *Kirsanov A.V., Fokin A.P., Kuftin A.N., Ananichev A.A., Golubiatnikov G.Y., Movshevich B.Z., Zuev A.S., Manuilov V.N., Tai E.M., Glyavin M.Y., Denisov G.G.* IEEE Trans. Electron Dev. 2025. V. 72. № 10. P. 5759. <https://doi.org/10.1109/TED.2025.3602037>.
3. *Kuftin A.N., Denisov G.G., Chirkov A.V. et al.* IEEE Electron Device Lett. 2023. V. 44. № 9. P. 1563. <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3294755>.
4. *Kharchev N.K., Batanov G.M., Kolik L.K. et al.* Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. Art. 013507. <https://doi.org/10.1063/1.4773544>.
5. *Vykhodtsev P.V., Klimov A.I., Rostov V.V., Tsygankov R.V., Priputnev P.V.* IEEE Trans. Instrum. Meas. 2021. V. 70. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3034971>
6. *Belousov V.I., Malygin V.I., Chirkov A.V., Denisov G.G., Kalynova G.I., Ilin V.I., Popov L.G.* Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission. Ed by J.L.Hirshfield, M.I. Petelin. NATO Sci. Ser. II: Math. Phys. Chem. V. 203. Dordrecht: Springer, 2005. p. 3. https://doi.org/10.1007/1-4020-3638-8_01
7. *Jung-Woo Ok, Seyong Choi, Byoung-Seob Lee, Jang-Hee Yoon, Jin Yong Park, Chang Seouk Shin, Mi-Sook Won.* J. Korean Phys. Soc. 2015. V. 66. № 3. P. 349. <https://doi.org/10.3938/jkps.66.349>
8. *Lei Zhao a,b, Weiye Xu b, Handong Xu.* Proc. of SPIE. 2024. V. 13181. P. 1666. <https://doi.org/10.1117/12.3031489>
9. *Guo Guo, Junwei Guo, Ling Gu, Xinjian Niu, Changyong Guo.* J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2018. V. 39. P. 1079. <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0532-0>
10. *Proyavin M.D., Kotomina V.E., Orlovskiy A.A., et al.* Micromachines. 2023. V. 14. № 10. P. 1897. <https://doi.org/10.3390/mi14101897>
11. *Проявин М.Д., Котомина В.Е.* РФ Патент 2795771C1, 2023.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Разработанная 3D-модель калориметра с входным волноводом диаметром 80 мм: **а** – волноводная вставка **1**; **б** – подготовленные к сборке составные части фотополимерного калориметра: волноводная вставка, крышка и корпус.
- Рис. 2.** Схема “водяной” части эксперимента: **1** – калориметр, **2, 9** – водяные насосы, **3, 10** – теплообменники, **4** – регулятор протока, **5, 7** – датчики температуры, **6** – калибровочный нагреватель, **8** – компьютер системы управления, **11** – выходной волновод исследуемого прибора.
- Рис. 3.** Временные зависимости измеренной мощности при калибровке двух разных калориметров (показывают выход на стационарный режим): для калориметра из алюминия – кривая **1**; для пластикового калориметра, изготовленного методом 3D-печати – кривая **2**. Для наглядности данные представлены для разных значений протока воды при одинаковых мощностях калибровочного нагревателя. Обрыв кривых соответствует стационарному состоянию.
- Рис. 4.** Временные зависимости измеренной мощности при включении на 3 мин вентилятора рядом с металлическим калориметром (кривая **1**) и фотополимерным калориметром (кривая **2**). Точки **А** и **В** соответствуют моментам включения и выключения вентилятора.
- Рис. 5.** Временные зависимости температуры входной (кривая **1**) и выходной воды (кривая **2**) (**а**) и СВЧ-мощности, восстановленной по результатам измерения (**б**).



(a)



(б)

Рис. 1.

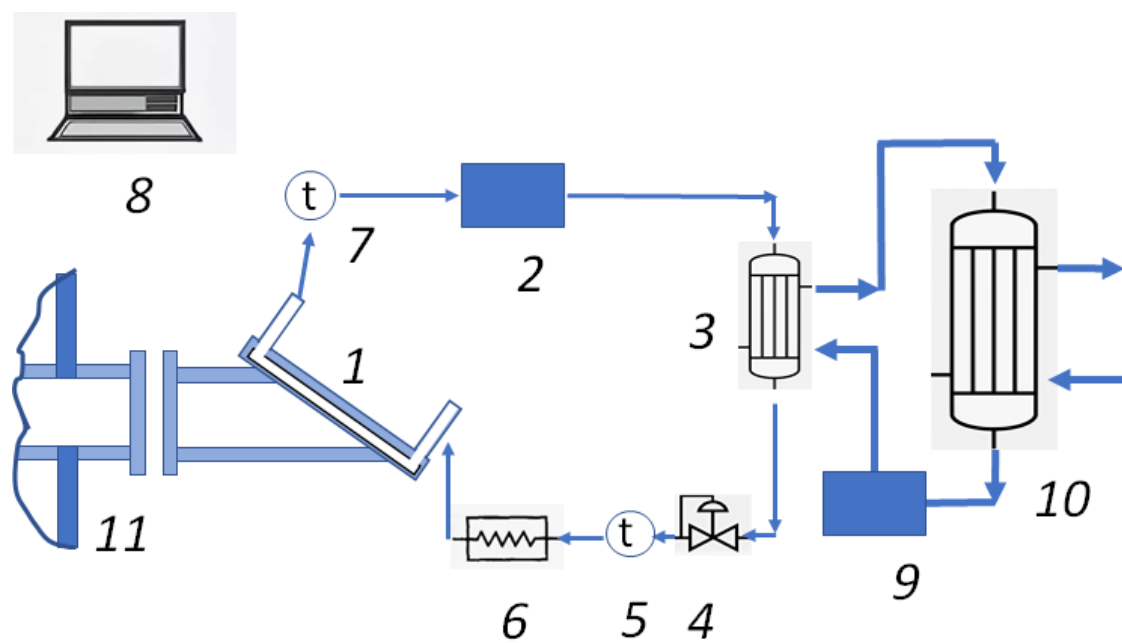


Рис. 2.

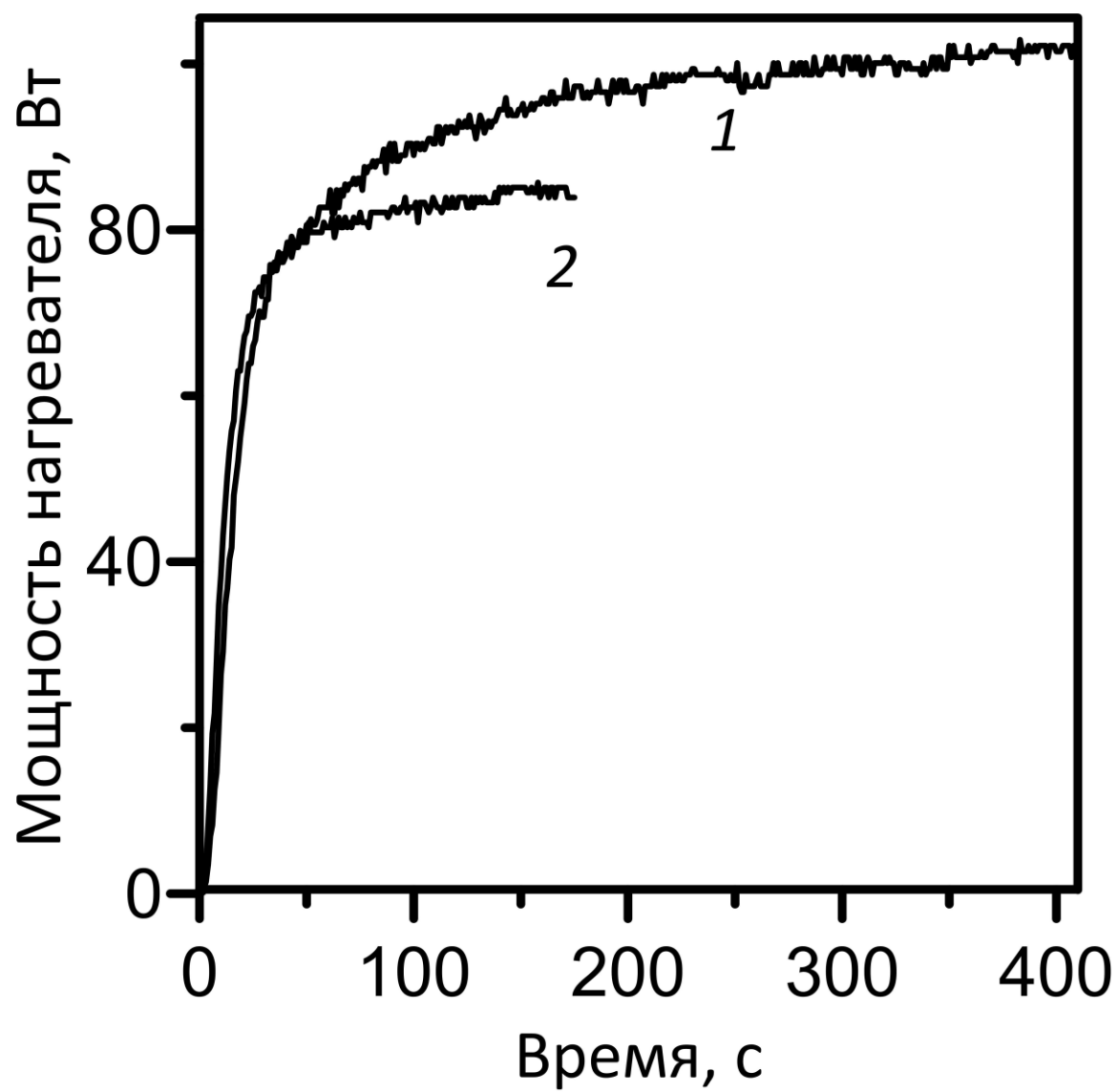


Рис. 3.

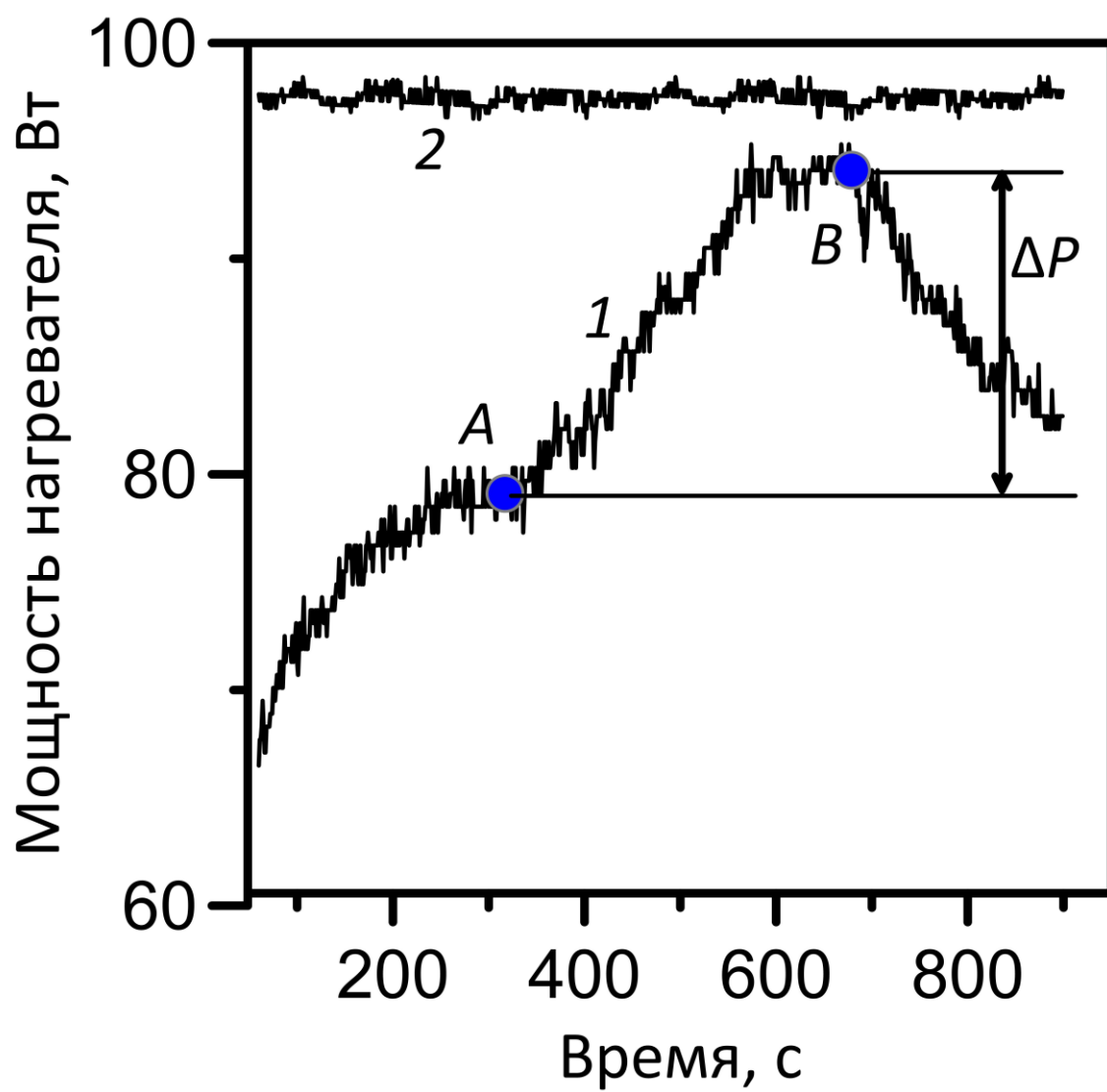


Рис. 4.

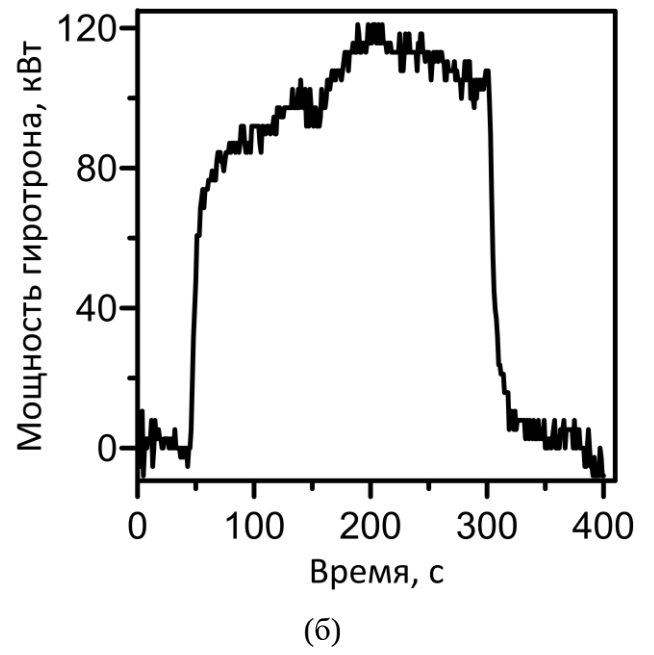
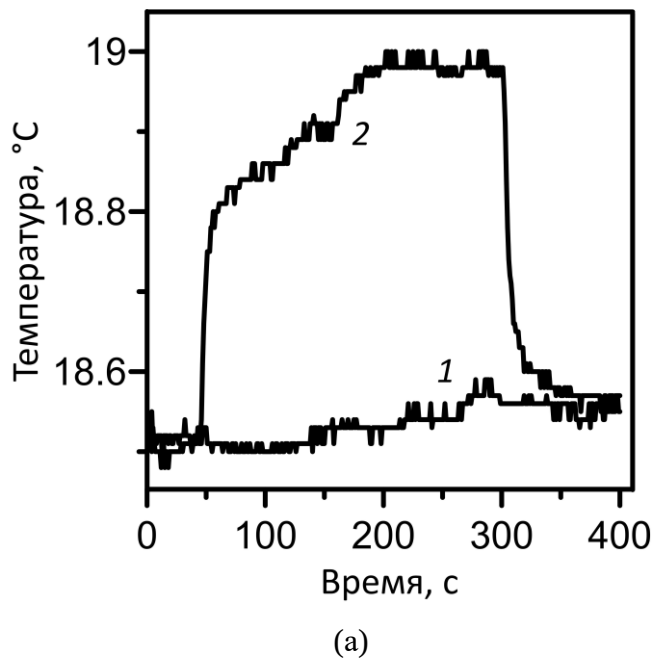


Рис. 5.