

Ця стаття розповсюджується на умовах відкритого доступу за академічною ліцензією
DOI: <https://10.15407/rej2018.03.003>
УДК 535.211:535.341
PACS: 42.25.Bs, 78.20.Nv

Н. Г. Кокодий^{1,2}, М. В. Кайдаш², С. В. Погорелов²

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина

E-mail: kokodiyng@gmail.com

²Национальный фармацевтический университет

53, ул. Пушкинская, Харьков, 61002, Украина

E-mail: marpog2000@gmail.com

ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОЧЕНЬ ТОНКОЕ ПРОВОДЯЩЕЕ ВОЛОКНО

Предмет и цель работы. В работе проведено экспериментальное исследование нового физического эффекта – сильного взаимодействия микроволнового излучения с очень тонкими ($d \ll \lambda$) проводящими волокнами. Вычисления показывают, что фактор эффективности поглощения волокна диаметром несколько микрометров при действии на него излучения в сантиметровом диапазоне может достигать нескольких сотен. Было обнаружено, что эффект усиливается при наклонном падении пучка излучения на волокно. Проведен эксперимент по измерению поглощения микроволнового излучения с длиной волны 1 см в графитовом волокне диаметром 12 мкм.

Методы и методология работы. Для определения поглощения излучения в волокне измеряется изменение сопротивления волокна при нагреве излучением. Для уменьшения погрешности результатов измерялось среднее значение сопротивления за 1 минуту. Сопротивление измерялось с частотой 2 Гц. Наблюдалась тепловая картина нагретого волокна тепловизором. Разработана математическая модель процесса нагрева волокна пучком излучения.

Результаты работы. Эксперимент показал, что графитовое волокно диаметром 12 мкм поглощает около 10 % энергии пучка микроволнового излучения с длиной волны 1 см, падающего на него. Температура нагрева в месте падения пучка достигает 200 °С. Математическая модель хорошо описывает процесс взаимодействия излучения и волокна.

Заключение. Результаты исследования подтвердили существование эффекта сильного взаимодействия микроволнового излучения с очень тонкими проводящими волокнами. Эффект может найти применение в установках, где необходимо передать энергию электромагнитного излучения малым мишеням. Другая область использования этого эффекта – создание защитных экранов от действия микроволнового излучения на человека или на различные установки. Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: фактор эффективности поглощения, тонкое волокно, микроволновое излучение, нагрев волокна.

В работах [1–4] было показано, что электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне может сильно поглощаться в металлических проволочках или других тонких проводящих волокнах, диаметр которых намного меньше длины волны. Фокусировка излучения при этом не нужна. Размеры фокального пятна могут быть в тысячи раз больше размеров мишени. Фактор эффективности поглощения (отношение площади эффективного поперечного сечения мишени к площади геометрического поперечного сечения) может достигать нескольких тысяч. При этом необходимо, чтобы электрический вектор волны был параллелен оси проволоки (E-волна).

Этот эффект очень сильно проявляется в микроволновом диапазоне при диаметре

проволоки в несколько микрометров. В эксперименте [1] в платиновой проволоке диаметром 20 мкм, помещенной в пучок излучения диаметром 3 см при длине волны излучения 1 см, поглощалось около 10 % энергии пучка. Диаметр пучка был в 1 500 раз больше диаметра проволоки. Излучение падало на проволоку перпендикулярно ее оси.

Фактор эффективности поглощения Q_{abs} зависит от соотношения между диаметром волокна D и длиной волны излучения λ . При некоторых значениях величины D/λ имеет место максимум поглощения. На рис. 1 показана зависимость фактора эффективности поглощения графитового волокна от его диаметра. Когда длина волны возрастает, максимум увеличивается. При $\lambda = 8$ мм фактор

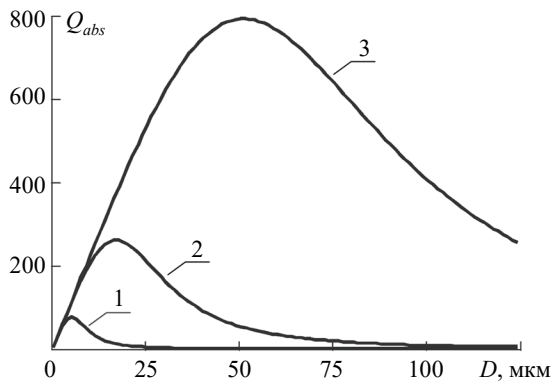


Рис. 1. Графики зависимости фактора эффективности поглощения Q_{abs} графитового волокна от диаметра волокна D для некоторых длин волн: кривая 1 – $\lambda = 8$ мм; кривая 2 – $\lambda = 10$ см; кривая 3 – $\lambda = 1$ м

эффективности поглощения графитового волокна в максимуме достигает величины 78, при $\lambda = 10$ см он составляет 260, а при $\lambda = 1$ м равен 780.

В случае H -волны (магнитный вектор волны параллелен оси волокна) фактор эффективности поглощения очень мал – его величина не превышает 0,01.

В работе [5] было показано, что поглощение энергии увеличивается при наклонном падении волны на волокно. На рис. 2, взятом из этой работы, показана зависимость поглощения излучения с длиной волны 1 см в графитовом волокне диаметром 12 мкм от угла падения волны. Длина волны излучения – 10,6 мкм. При вычислениях использовались формулы дифракции электромагнитной волны на круговом цилиндре [6, 7].

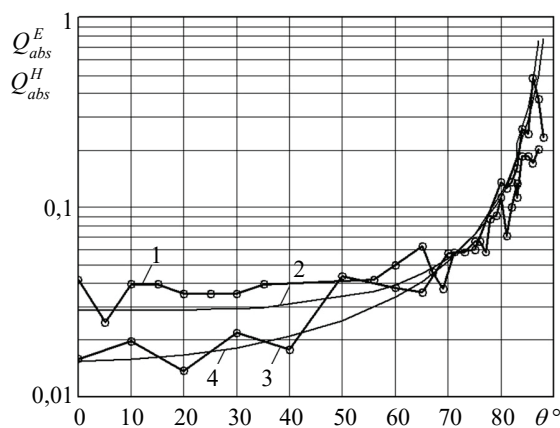


Рис. 2. Графики зависимости фактора эффективности поглощения Q_{abs} от угла падения волны θ : кривая 1 – для H -волны (эксперимент); кривая 2 – для H -волны (теория); кривая 3 – для E -волны (эксперимент); кривая 4 – для E -волны (теория)

Особенно сильное поглощение при углах падения, больших 60° . Фактор эффективности поглощения здесь в несколько раз больше, чем при нормальном падении, причем значения факторов эффективности для E -волны и H -волны почти одинаковы.

Природа сильного поглощения при скользющем падении волны неясна. Поглощение энергии в проводнике всегда связано с возникновением электрического тока, а значит, с наличием продольной составляющей электрического поля. Но в волне, падающей вдоль волокна, вектор электрического поля почти нормален в оси волокна. По-видимому, причиной является искажение формы волны вблизи проводника.

Сильное поглощение микроволнового излучения в тонких проводящих волокнах может быть использовано для создания защитных экранов в этом диапазоне. Результаты исследования образцов таких экранов были описаны в работе [8].

В данной работе описан эксперимент, подобный описанному в работе [5], но в микроволновом диапазоне.

1. Экспериментальная установка. В эксперименте измерялось поглощение микроволнового излучения в графитовом волокне диаметром 12 мкм. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

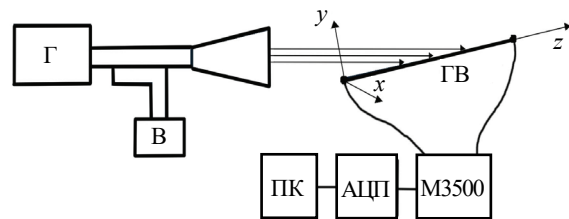


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

Длина волны излучения генератора Γ составляла 1 см, мощность излучения – 0,5 Вт. Для контроля мощности используется термисторный ваттметр B с направленным ответвителем. Пучок излучения направляется на середину графитового волокна $ГВ$ длиной 280 мм под углом 68° к нормали. Профиль пучка близок к гауссовскому. Среднеквадратичные радиусы поперечного сечения пучка в месте падения на волокно: $r_z = 4$ мм в направлении вдоль оси волокна и $r_x = 7$ мм в поперечном направлении.

Поглощение излучения в волокне вызывает его нагрев и изменение электрического сопротивления. Для измерения сопротивления служит мультиметр М3500. Сигнал с него через аналого-цифровой преобразователь АЦП вводится в компьютер ПК. В течение 1 мин измерялось сопротивление «холодного» волокна, затем включался генератор, и в течение 1 мин измерялось сопротивление «горячего» волокна. Эти сигналы усреднялись.

При температуре $T_1 = 20^\circ\text{C}$ сопротивление волокна составило $R_1 = 31\,230\ \text{Ом}$. Температурный коэффициент сопротивления графита отрицателен, так что под действием излучения сопротивление волокна уменьшалось до величины $R_2 = 31\,135\ \text{Ом}$.

2. Математическая модель процесса нагрева. На волокно падает гауссовский пучок излучения, профиль которого описывается формулой

$$I(x, z) = I_0 \exp\left[-\left(\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{z^2}{r_z^2}\right)\right],$$

где I_0 – интенсивность на оси пучка.

Интенсивность излучения I_0 связана с мощностью в пучке P_0 соотношением:

$$I_0 = \frac{P_0}{\pi r_x r_z}.$$

При $P_0 = 0,5\ \text{Вт}$, $r_z = 4\ \text{мм}$ и $r_x = 7\ \text{мм}$ интенсивность $I_0 = 5\,684\ \text{Вт/м}^2$.

Вдоль оси волокна интенсивность излучения меняется по закону

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{z^2}{r_z^2}\right). \quad (1)$$

На участке dz с координатой z поглощается мощность

$$dP_{abs}(z) = I(z) Q_{abs} D dz, \quad (2)$$

где Q_{abs} – фактор эффективности поглощения. Для графитового волокна диаметром $12\ \mu\text{м}$, длины волны излучения $1\ \text{см}$ и угла падения волны 68° фактор $Q_{abs} = 65$.

Поглощенная в волокне мощность равна

$$P_{abs} = Q_{abs} D \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z) dz = 0,031\ \text{Вт}.$$

Следовательно, в волокне поглощается около 6 % падающей на него мощности,

несмотря на то, что диаметр пучка в 500 раз больше, чем диаметр волокна.

При оценке температуры нагрева волокна сделаем три допущения:

1) температура по всему поперечному сечению волокна одинакова;

2) распределение температуры вдоль волокна повторяет распределение интенсивности падающего излучения;

3) теплофизические параметры волокна (теплоемкость, теплопроводность, теплообмен с внешней средой и др.) не зависят от температуры.

Пункты 1 и 2 связаны с малой толщиной волокна и малым тепловым потоком вдоль него. Решение тепловой задачи (здесь не приводится) подтверждает эти положения. Пункт 3 при сильном нагреве (несколько сотен градусов) не выполняется. Но учет этих зависимостей при решении тепловой задачи показывает, что эффективность передачи энергии излучения волокну больше, чем оценка, сделанная при допущении пункта 3. Поэтому данная оценка является минимально возможной.

Согласно закону Ньютона–Рихмана, для теплообмена тонкого волокна с внешней средой повышение температуры тела при мощности нагрева P_{abs} равно:

$$T = \frac{P_{abs}}{\alpha_p L}, \quad (4)$$

где α_p – погонный коэффициент теплообмена с внешней средой. Он определяет мощность, уходящую во внешнюю среду от волокна длиной $1\ \text{м}$ при разности температур волокна и среды $1\ \text{К}$. Для тонкого волокна α_p не зависит от диаметра [9].

Используя уравнения (1)–(3), получим выражение для распределения температуры вдоль волокна:

$$T(z) = \frac{I_0 Q_{abs} D}{\alpha_p} \exp\left(-\frac{z^2}{r_z^2}\right), \quad (5)$$

При перечисленных выше значениях параметров пучка излучения и волокна и измеренном в эксперименте параметре $\alpha_p = 0,02\ \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ температура в максимуме составляет 242°C . На рис. 4 показано распределение температуры вдоль волокна, полученное с помощью тепловизора. Видно, что размер нагретого до высокой температу-

ры участка волокна равен примерно 8 мм, т. е. диаметру пучка вдоль оси z . В соответствии с данными тепловизора, температура нагретой части волокна составляла более 200 °С, а температура других участков волокна – лишь несколько десятков градусов, что обусловлено нагревом волокна током прибора для измерения сопротивления. Это согласуется с результатами расчетов.

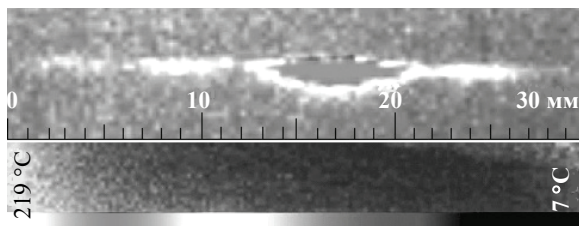


Рис. 4. Тепловая картина нагрева волокна излучением

На рис. 5 показан результат цифровой обработки картины, представленной на рис. 4. Причина изрезанности графика – зернистость картины. Сплошная линия – сглаженный график распределения температуры вдоль волокна. Качественно он согласуется с рис. 4 и результатами расчетов.

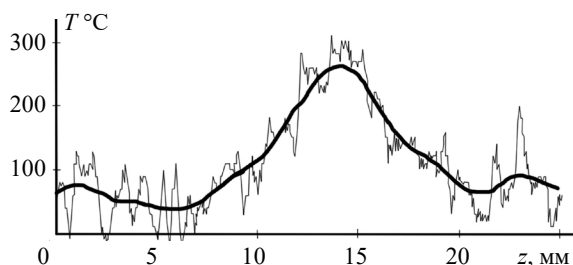


Рис. 5. Распределение температуры вдоль волокна

Оценим изменение сопротивления волокна при его нагреве излучением. Зависимость сопротивления от температуры определяется формулой:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_R T), \quad (5)$$

где R_0 – сопротивление при 0 °С, $\alpha_R = -0,00034$ 1/К – температурный коэффициент сопротивления графита. Коэффициент α_R был определен экспериментально, так как сильно зависит от способа изготовления используемого волокна. Он отрицательный. Это означает, что сопротивление волокна уменьшается при нагреве.

По формуле (5) было найдено, что $R_0 = 31\,440$ Ом.

Из уравнения, связывающего проводимость волокна и его сопротивление, была найдена величина проводимости при 0 °С:

$$\sigma_0 = \frac{4L}{\pi D^2 R_0} = 7,87 \cdot 10^4 \text{ 1/(Ом}\cdot\text{м)}.$$

Зависимость проводимости от температуры:

$$\sigma = 1/(1 + \alpha_R T).$$

Сопротивление участка волокна длиной dz :

$$dR(z) = \frac{4 dz}{\pi D^2 \sigma}.$$

Тогда сопротивление всего волокна:

$$R = \frac{4}{\pi D^2 \sigma_0} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [1 + \alpha_R T(z)] dz. \quad (6)$$

Вычисления по формуле (6) с использованием выражения (4) дают значение сопротивления «горячего» волокна: $R = 31\,125$ Ом.

Этот результат хорошо согласуется со значением, полученным в эксперименте: $R = 31\,135$ Ом. Поэтому можно считать, что математическая модель правильно описывает процесс нагрева волокна электромагнитным излучением, а оценка поглощенной мощности излучения в волокне (0,031 Вт) и коэффициента поглощения (6 %) соответствует истине.

3. Обработка результатов измерений.

Используя уравнение (5), показывающее зависимость сопротивления волокна от температуры, и значения сопротивления «холодного» R_1 и «горячего» R_2 волокна, можно найти температуру нагрева волокна излучением T_2 :

$$T_2 = \frac{1}{\alpha_R} \left[\frac{R_2}{R_1} (1 + \alpha_R T_1) - 1 \right].$$

Вычисления по этой формуле дают $T_2 = 28,9$ °С. Это средняя по длине волокна температура, но выше было показано, что в некоторых местах она превышает 200 °С.

Поглощенная в волокне мощность может быть вычислена по формуле $P_{abs} = \alpha_P L(T_2 - T_1)$, которая следует из уравнения (3). Подставив сюда значения, полученные в эксперименте, получим: $P_{abs} = 0,05$ Вт.

Следовательно, в волокне поглощается 10 % энергии падающего на него излучения. Разница между этой величиной и величиной, полученной в результате математического моделирования, объясняется допущениями, сделанными при теоретической оценке поглощенной мощности, и неточностью вычисления фактора эффективности поглощения по формулам теории дифракции. Но и теория, и эксперимент подтверждают существование эффекта аномально большого поглощения электромагнитного излучения в очень тонких проводящих волокнах и возможность его использования в технике.

Выводы. Таким образом, в работе дано экспериментальное подтверждение эффекта сильного поглощения электромагнитного излучения в очень тонких проводящих волокнах при наклонном падении волны в микроволновом диапазоне. В графитовом волокне диаметром 12 мкм поглощается 10 % энергии падающего на него под углом 68° микроволнового излучения с длиной волны 1 см. Диаметр пучка излучения 10 мм, что более чем в 800 раз больше диаметра волокна.

Построена простая математическая модель процесса нагрева волокна излучением.

Эффект может использоваться для передачи энергии электромагнитного излучения тонким волоконным мишеням и для создания защитных экранов в микроволновом диапазоне.

Библиографический список

- Кузьмичев В. М., Кокодий Н. Г., Сафонов Б. В., Балкашин В. П. Фактор эффективности поглощения тонкого металлического цилиндра в микроволновом диапазоне. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48, № 11. С. 1348–1351.
- Кокодий Н. Г. Поглощение сверхвысокочастотного излучения очень тонким двухслойным цилиндром. *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51, № 2. С. 1–4.
- Хе Ши, Шульга С. Н., Кокодий Н. Г., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Бутрым А. Ю., Джан Ю. Взаимодействие электромагнитных волн в волноводе с очень тонкими проволоками. *Радиотехника и электроника*. 2011. Т. 56, № 10. С. 1201–1204.
- Akhmeteli A., Kokodiy N. G., Safronov B. V., Balkashin V. P., Priz I. A., Tarasevitch A. Efficient non-resonant absorption in thin cylindrical targets: experimental evidence for longitudinal geometry. *ArXiv*. 2013. URL: <https://arxiv.org/pdf/1208.0066v4.pdf> (Last accessed 7 March 2014).
- Kuz'michev, V. M., Kokodiy, N. G., Safronov, B. V., Balkashin, V. P., 2003. Values of the absorption efficiency factor of a thin metal cylinder in the microwave band. *J. Commun. Technol. El.*, **48**(11), pp.1240–1242.
- Kokodiy, N. G., 2006. Microwave radiation absorption in an ultrathin double-layer cylinder. *J. Commun. Technol. El.*, **51**(2), pp. 175–178. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226906020069>
- He, S., Shulga, S. N., Kokodiy, N. G., Gorobets, N. N., Kiiko, V. I., Butrym, A. Yu., Zheng, Y., 2011. Interaction of electromagnetic waves in a waveguide with very thin wires. *J. Commun. Technol. El.*, **56**(10), pp. 1193–1196. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226911100123>
- Akhmeteli, A., Kokodiy, N. G., Safronov, B. V., Balkashin, V. P., Priz, I. A., Tarasevitch, A., 2013. Efficient non-resonant absorption in thin cylindrical targets: experimental evidence for longitudinal geometry. *ArXiv*, [online] Available at: <https://arxiv.org/pdf/1208.0066v4.pdf> [Accessed 7 March 2014]
- Kokodiy, N. G., Kaydash, M. V., Timaniuk, V. A., 2017. Interaction of electromagnetic radiation with a thin metal wire in the case of a glancing incident wave. *J. Commun. Technol. El.*, **62**(3), pp. 205–211. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226917030123>
- Wait, J. R., 1955. Scattering of a plane wave from a circular dielectric cylinder at oblique incidence. *Can. J. Phys.*, **33**(5), pp. 189–195. DOI:<https://doi.org/10.1139/p55-024>
- Lind, A. C., Greenberg, J. M., 1966. Electromagnetic scattering by obliquely oriented cylinders. *J. Appl. Phys.*, **37**(8), pp. 3195–3203. DOI:<https://doi.org/10.1063/1.1703184>
- Kokodiy, N. G., Natarova, A. O., Timanyuk, V. A., Priz, I. A., 2017. Flexible protecting screens for microwave band on the basis of thin conducting fibers. *Radiofiz. Elektron.*, **22**(2), pp. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.079>

REFERENCES

9. Bosworth, R.C.L., 1952. *Heat transfer phenomena. The flow of heat in physical systems*. New York: John Wiley and Sons.

Рукопись поступила 08.05.2018.

N. G. Kokodii, M. V. Kaydash,
S. V. Pogorelov

THERMAL ACTION OF MICROWAVE RADIATION ON A VERY THIN CONDUCTING FIBRE

The subject and purpose. The experimental findings of a new physical effect of a strong interaction of microwave radiation with very thin ($d \ll \lambda$) conducting fibers are presented in the paper. The calculations show that the absorption efficiency factor of fiber of a diameter of several micrometers when exposed to radiation in the centimeter range can reach the value of several hundred. It was found that the effect can be enhanced by oblique incidence of the radiation beam. An experiment to measure the absorption of microwave radiation with a wavelength of 1 cm in a graphite fiber with a diameter of 12 μm has been carried out.

Methods and methodology. To determine the absorption of radiation in a fiber the change in the resistance of the fiber when heated by radiation was measured. To reduce the error of the results, the average value of resistance for 1 minute was measured. The resistance was measured at a frequency of 2 Hz. A thermal picture of the heated fiber was observed by means of a thermal imager. A mathematical model of the fiber heating process by the radiation beam is developed.

Results. The experiment has showed that a graphite fiber with a diameter of 12 μm absorbs about 10 % of the energy of the incident microwave beam with a wavelength of 1 cm. The heating temperature at the place of incidence of the beam reaches 200 °C. The developed mathematical model describes the interaction process of radiation and fiber well.

Conclusion. The results of the study confirmed the existence of a strong interaction of microwave radiation with very thin conducting fibers. The effect can find application in installations where it is necessary to transfer energy of electromagnetic radiation to small targets. Another area of usage of this effect is the creation of protective screens against the effects of microwave radiation on a person or on different installations.

Key words: absorption efficiency factor, thin fiber, microwave radiation, heating.

М. Г. Кокодій, М. В. Кайдаш,
С. В. Погорелов

ТЕПЛОВА ДІЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ДУЖЕ ТОНКЕ ПРОВІДНИКОВЕ ВОЛОКНО

Предмет і мета роботи. У роботі проведено експериментальне дослідження нового фізичного ефекту – сильної взаємодії мікрохвильового випромінювання з дуже тонкими провідниковими волокнами ($d \ll \lambda$). Обчислення показують, що фактор ефективності поглинання волокна діаметром декілька мікрометрів при дії на нього випромінювання в сантиметровому діапазоні може досягати декількох сотень. Ефект посилюється при похилому падінні пучка випромінювання на волокно. Проведено експеримент з вимірювання поглинання мікрохвильового випромінювання з довжиною хвилі 1 см у графітовому волокні діаметром 12 мкм.

Методи і методологія роботи. Для визначення поглинання випромінювання у волокні вимірюється зміна опору волокна при нагріванні випромінюванням. Для зменшення похибки результатів вимірювалося середнє значення опору за 1 хвилину. Опір вимірювався з частотою 2 Гц. Спостерігалася тепла картина нагрітого волокна тепловізором. Розроблено математичну модель процесу нагрівання волокна пучком випромінювання.

Результати роботи. Експеримент показав, що графітове волокно діаметром 12 мкм поглинає близько 10 % енергії пучка мікрохвильового випромінювання з довжиною хвилі 1 см, яке падає на нього. Температура нагрівання в місці падіння пучка досягає 200 °C. Математична модель добре описує процес взаємодії випромінювання і волокна.

Висновок. Результати дослідження підтвердили існування ефекту сильної взаємодії мікрохвильового випромінювання з дуже тонкими провідниковими волокнами. Ефект може знайти застосування в установках, де необхідно передати енергію електромагнітного випромінювання малим мішеням. Інша область використання цього ефекту – створення захисних екранів від впливу мікрохвильового випромінювання на людину або різні установки.

Ключові слова: фактор ефективності поглинання, тонке волокно, мікрохвильове випромінювання, нагрівання.