

## Розподіл тепла і величина теплового ефекту при дії НВЧ-електромагнітного поля на тварин

В. І. Мирутенко

Лабораторія біофізики Інституту фізіології  
ім. О. О. Богомольця Академії наук УРСР, Київ

Інтенсивності надвисокочастотного (НВЧ) поля, які перевищують  $1,5-0,8$  мвт/см<sup>2</sup> ( $\lambda=3$  см), при дії на тварин (Мирутенко, 1962 а) і  $5-3,5$  мвт/см<sup>2</sup> ( $\lambda=11$  см) при дії на людину (Пресман, 1957) викликають підвищення температури опромінених ділянок тіла. Величина теплового ефекту залежить, крім падаючої інтенсивності або, точніше кажучи, поглинутої енергії НВЧ-поля, від тривалості опромінення, умов навколишнього середовища, поверхні опромінення, досконалості терморегуляторного апарата і функціонального стану тварини та ін. (звичайно, при тій самій довжині хвилі).

На ці факти вказують численні експериментальні дослідження (Солсбері, Кларк і Хайнс, 1949; Бойль, Кук і Буханан, 1950; Кук, 1951—1952; Шван і Лі, 1956; Шван і Пірсол, 1954, 1955; Хірч, 1956; Пресман, 1956, 1957, 1961, 1963; Тягін, 1957, та ін.).

Більшість згаданих авторів, говорячи про значення анатомічної ділянки при її опроміненні в НВЧ-полі, вказують на роль кровообігу або кровопостачання тканин та його здатність відводити лишки тепла від опромінених тканин. Кук (1952) вивчав величину теплового ефекту при впливі енергії 10 см електромагнітних хвиль на ішемізовані тканини тварини (собаки) та на ділянки з нормальним кровопостачанням. Було показано, що в усіх випадках в ішемізованих тканинах величина теплового ефекту була більшою.

В праці Вордена, Херріка та ін. (1948) наведені результати вимірювання температури стегна собаки з нормальним і порушеним кровообігом при місцевому опроміненні НВЧ-полем ( $\lambda=12$  см).

При порушеній циркуляції крові спостерігалось більше підвищення температури тканин стегна собаки, ніж у тканинах з нормальним кровообігом при всіх інших однакових умовах.

Для НВЧ-поля з довжиною хвилі 3 см подібних дослідів не проводили. Відомо, що енергія хвиль цих довжин поглинається в кількох міліметрах тканин (Шван і Лі, 1956; Москаленко, 1960; Мирутенко, 1962 а, б) та, ймовірно, безпосередньо в більш глибокі шари тканин не проникає. Однак нами дослідним шляхом встановлено (1960), що при загальному опроміненні щурів у НВЧ-полі інтенсивностями 0,4 і 0,2 вт/см<sup>2</sup> температура підвищувалась в усіх органах і тканинах тварини, недоступних безпосередньому проникненню енергії. Мабуть, кровообіг в даному випадку відіграє не останню роль. Саме з'ясуванню цього питання і присвячені наші дослідження.

В дослід було взято 25 щурів і 5 кроликів. Було проведено три серії експериментів. У першій серії (15 щурів) вивчали роль кровообігу в розподілі тепла по органах і тканинах тварини при загальному опроміненні в НВЧ-полі інтенсивністю  $0,22 \text{ Вт/см}^2$  живих тварин і трупів. У другій серії (10 щурів) досліджували вплив кровообігу на величину теплового ефекту при місцевій дії НВЧ-поля тієї ж інтенсивності.

В третій серії дослідів (5 кроликів) були проведені вимірювання температури крові, яка надходить і відтікає від окремо взятого органа (або ділянки тіла) тварини, опроміненої НВЧ-полем (в дослідках були використані окремих орган тварини — голова і окрема ділянка тіла — стегно).

Вимірювання густини потоку потужності, визначення поглинутої енергії НВЧ-поля і реєстрацію теплового ефекту проводили методами, описаними нами в раніше опублікованих працях (1960, 1962; Мирутенко, Березовський, 1962).

### Результати досліджень

На 15 щурах було досліджено тепловий ефект у підшкірних тканинах на глибині  $1,5 \text{ мм}$ , в печінці і прямій кишці при загальному опроміненні в НВЧ-полі інтенсивністю  $0,22 \text{ Вт/см}^2$  протягом  $14 \text{ хв}$ . Тварина

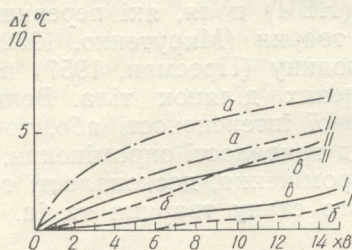


Рис. 1. Приріст температури органів і тканин живого щура (II) і трупа (I), опромінених НВЧ-полем.

а — під шкірою на глибині  $1,5 \text{ мм}$ , б — в прямій кишці, в — в печінці.

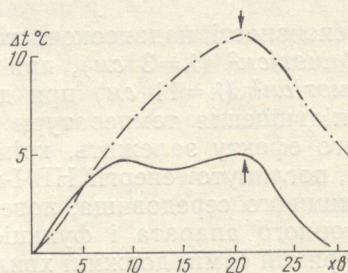


Рис. 2. Приріст температури під шкірою на глибині  $1,5 \text{ мм}$  живого щура (суцільна крива) і трупа (штрих-пунктирна крива). Місцеве опромінення, площею  $7 \text{ см}^2$ . Стрілкою на рисунках показано момент вимкнення генератора.

після першого опромінення через деякий час приходила до норми, тобто у неї відновлювалась така температура у відповідних місцях вимірювання, яка була перед дослідом. Час, протягом якого тварина за температурними показниками повертається в переддослідний стан, іноді досягав години. Потім, не порушуючи фіксації температурних датчиків, тварину вбивали повітряною емболією і знову опромінювали НВЧ-полем тієї ж інтенсивності і тривалості.

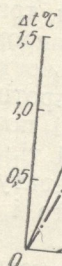
В даному разі можна вважати, що смерть тварини, яка настає внаслідок повітряної емболії, є клінічною, а не біологічною. Припускають, що клінічна смерть істотно не змінює теплопровідності тканин, що могло б позначитись на розподілі тепла. В цьому випадку вважалося, що із всіх факторів, які діяли раніше і впливали на розподіл тепла по органах і тканинах тварини, виключений фактор кровообігу.

На рис. 1 наведені результати описаних досліджень.

На рис. 2 представлений найбільш типовий приклад розходжень росту температури в тканинах при місцевій дії НВЧ-поля інтенсивністю  $0,22 \text{ Вт/см}^2$  на протязі  $20 \text{ хв}$  на живих тваринах і трупах. Стрілкою на рис. 2 показано момент вимкнення джерела випромінювання.

Для вивчення впливу кровообігу на транспорт тепла в опроміненіх тканинах вимірювали температуру крові, що надходить та відтікає від опроміненого органа. В першому випадку (рис. 3-А) опроміню-

вали стегно, що надходить кінцівки (стегно). В другій серії вимірювали температуру крові, що відтікає від



вимірювання температури вночі.

Для того, щоб повертатись в норму, ліва яремна вена зсідання крові, (1 мл на 1 кг ваги)

Підвищення температури органів є результатом безпосереднього впливу внаслідок владнання в поверхневі і внутрішні кількості теплової енергії. Збільшення температури внаслідок вторинних процесів в тілі вглиб завдяки теплопроводності та теплоємності і до певної міри до певної частини опромінення тварини в процесі кровообігу. Привертає увагу, що не брало до уваги ділянок збільшення температури як при виключенні одночасно з опроміненням одну хвилину, а в наступні шість хвилин температура вища, при тих же умовах з живими тваринами з цих тканин не вилучено (штрих-пунктирна). Слід гадати, що при опроміненні тепло передачується теплопроводністю.

вали стегно кролика площею  $7 \text{ см}^2$  і вимірювали температуру крові, що надходить в кінцівку (стегова артерія), і крові, що відтікає від кінцівки (стегова вена).

В другому випадку на тих же п'яти кроликах (рис. 3-Б) вимірювали температуру крові, що надходить до голови в сонній артерії і відтікає від голови кролика в яремній вені з правого боку, причому

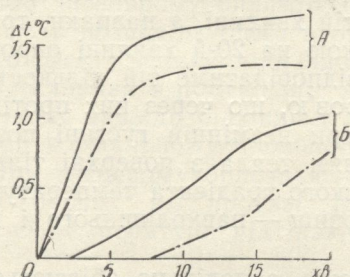


Рис. 3. Приріст температури крові при опроміненні стегна (А) і голови (Б) кролика НВЧ-полем інтенсивністю  $0,22 \text{ Вт/см}^2$ .

А — суцільна крива — в стеговій вені, штрих-пунктирна крива — в стеговій артерії; Б — суцільна крива — в яремній вені, штрих-пунктирна крива — в сонній артерії.

вимірювання температури крові і опромінення завжди проводили одночасно.

Для того, щоб нагріта опроміненими тканинами відтікаюча кров поверталась в основне русло кровообігу тільки через праву яремну вену, ліва яремна вена була під час досліду перев'язана. Щоб запобігти зсіданню крові, був використаний однопроцентний розчин синантрину (1 мл на 1 кг ваги), який вводили заздалегідь у вушну вену.

#### Обговорення результатів досліджень

Підвищення температури в опромінених НВЧ-полем тканинах і органах є результатом перетворення електромагнітної енергії в теплову внаслідок властивих НВЧ-полю механізмів поглинання. Проникаючи у поверхневі шари тканин тварини, енергія НВЧ-поля утворює основну кількість тепла в підшкірних тканинах і шкірі.

Збільшення температури тканини печінки може бути як результатом безпосереднього проникнення хвиль у тканини печінки, так і наслідком вторинних процесів, зумовлених дифузією тепла від поверхні тіла вглиб завдяки теплопровідності, а також в результаті перенесення тепла від більш теплих тканин з кров'ю по всьому організму, в тому числі і до печінки. Підвищення температури в прямій кишці при опроміненні тварини в НВЧ-полі більше зумовлюється розподілом тепла в процесі кровообігу, ніж дифузійним розсіюванням тепла.

Привертає увагу той факт, що при нормальному кровообігу, якщо не брати до уваги вплив наркозу, температура в усіх вимірюваних ділянках збільшується одночасно з початком впливу НВЧ-поля, тимчасом як при виключеному кровообігу температура під шкірою підвищується одночасно з початком опромінення, в печінці запізнюється на одну хвилину, а в прямій кишці температура починає збільшуватись через шість хвилин. В підшкірних тканинах температура в півтора раза вища, при тих же густинах потоку потужності у трупів у порівнянні з живими тваринами. Це, мабуть, пояснюється тим, що лишок тепла з цих тканин не відводиться потоком крові (рис. 1, а) крива штрих-пунктирна). Слід гадати, що збільшення температури печінки і прямої кишки при опромінюванні тварини з виключеним кровообігом зумовлено передачею тепла від нагрітих тканин до холодних завдяки їх теплопровідності.

На рис. 2 показано, що на десятій хвилині опромінення відзначається значне гальмування росту температури, що зумовлено посиленням кровообігу під впливом НВЧ-поля (суцільна крива). При виміканні джерела випромінювання, що показано на рис. 2 стрілкою, температура різко знижується.

Якщо опромінювати тварину з виключеним кровообігом, то на температурній кривій (рис. 2, пунктирна крива) не спостерігається зниження росту температури на десятій хвилині, а навпаки, триває закономірний ріст з невеликою затримкою на 20-й хвилині опромінення. Різниця в показниках температури відповідатиме тій кількості тепла, яка відводиться з нагрітих тканин кров'ю, що через них протікає. Нелінійність підвищення температури при незмінній густині потоку потужності пояснюється випромінюванням тепла з поверхні тіла в навколишнє середовище за рахунок великого градієнта температури, який спостерігається на межі двох середовищ — навколишнього і поверхні тіла тварини.

Ці та раніше одержані дані досить задовільно збігаються з результатами досліджень Роберта і Кука (1952), Кука (1952), Вордена (1948) та ін., які показали, що в ішемізованих тканинах температура при опромінюванні їх НВЧ-полем ( $\lambda = 10-12$  см) завжди вища, ніж у тканинах з нормальним кровообігом.

Якщо погодитись з твердженням, що потік крові відбирає зайве тепло від опромінених тканин, то залишилось перевірити, чи збільшуватиметься температура крові, що відтікає від опромінених ділянок тіла тварини.

Неважко переконатись, що результати досліджень, наведені на рис. 3-А і Б, цілком підтверджують подібне припущення. І дійсно, ми вважаємо, що кров, як і всі рідини, заповнюючи судини і капіляри тієї ділянки тіла, яку піддають опромінюванню, також може нагріватись, поглинаючи деяку частину енергії НВЧ-поля і, протікаючи по неопроміненим тканям, навіть віддавати зайве тепло.

Температура крові визначається як кількістю тепла, яке вона відбирає від опромінених тканин, так і внаслідок поглинання енергії хвиль в самій крові. Віддиференціювати ці два факти один від одного методом, яким ми користувались, неможливо.

В зв'язку з тим, що кров під час опромінення постійно рухається, в однакові проміжки часу вона одержуватиме різні кількості тепла. З одного боку, кров одержує рівні частки тепла за рахунок поглинання енергії в ній, а, з другого боку, кров з часом одержує дедалі більшу частину тепла від опромінених тканин. У відповідності з цими міркуваннями, температура крові, що відтікає від опромінених органів або тканин, має збільшуватись повільно. Чим вище температура крові, тим інтенсивніше вона віддаватиме своє тепло неопроміненим тканинам, поки дійде до місця вимірювання температури, і на протязі відповідного часу опромінення (5—15 хв) настає стан теплової рівноваги. Ступінь збільшення температури й умови рівноваги залежатимуть від падаючої інтенсивності поглинутої енергії, довжини хвилі, анатомічної ділянки, кровопостачання, відстані від опромінюваної ділянки до місця вимірювання температури, умов навколишнього середовища та інших факторів.

В результаті проведених дослідів було встановлено, що температура крові, яка надходить до опроміненого органа, також збільшується, але завжди на меншу величину. Це можна пояснити перемішуванням крові в організмі взагалі і дифузійним нагріванням тканин, прилеглих до судин. Результати вимірювання температури крові, що від-

тікає від оп  
кількість теп  
ма швидкіст  
Шаталовою  
стосування у

Аналіз с  
1. При з  
хвилі 3 см в  
теплового еф  
2. В тка  
дії НВЧ-поля  
нинах при н  
3. При м  
вок чи голо  
0,22 вт/см<sup>2</sup> т

Мирутенко І  
ханизма дей  
УРСР, т. 8,  
стотного (С  
ференція мол  
гів. Вид-во А  
автор — В. А  
Москаленко  
Пресман А. С.  
и мед., № 2,  
логи, т. 56, в  
Тягин Н. В., О  
Шаталова Г.  
Boyle N. C., C  
Cook H. F., Brit  
Hirsch F. G., H  
Roberts J. E.,  
Salisbury W.  
Schwan H. P.,  
Schwan H. P., p  
p. 425.  
Worden F. H., I  
v. 29, 1948, p. 7

Распреде  
при воздейст

Были провед  
на распределе  
сверхвысокочаст  
Для разрешения  
участках тканей  
щении (крысы у  
6—Физиологический журнал

тікає від опромінених органів і тканин, дають можливість встановити кількість тепла, яке буде відібране від тканин за умови, що буде відомо швидкість об'ємного кровоструменя. Аналогічні досліди проведені Шаталовою і Белицькою (1941) при роботі з УКХ і знайшли своє застосування у фізіотерапії.

Аналіз одержаних нами даних дозволяє зробити такі висновки:

1. При загальному опромінюванні тварин НВЧ-полем з довжиною хвилі 3 см в розподілі тепла в органах і тканинах тіла та у величині теплового ефекту велику роль відіграє кровообіг.

2. В тканинах з порушеним кровопостачанням тепловий ефект при дії НВЧ-поля завжди більший у порівнянні з тепловим ефектом в тканинах при нормальному кровопостачанні.

3. При місцевому опромінюванні окремих органів тварини (кінцівок чи голови) на протязі 15—20 хв НВЧ-полем інтенсивністю 0,22 Вт/см<sup>2</sup> температура відтікаючої крові збільшується на 1—1,5° С.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Мирутенко В. И., Материалы научной конференции по вопросам биофизики и механизма действия ионизирующей радиации. К., 1960, с. 129; а) Фізiol. журн. АН УРСР, т. 8, № 3, 1962, с. 382; б) в сб. «Вопросы биол. действия сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля», Л., 1962, с. 33; в) Пята об'єднана конференція молодих учених Київських товариств фізіологів, біохіміків та фармакологів. Вид-во АН УРСР, К., 1962, с. 52; Фізiol. журн. АН УРСР, т. 8, № 6, 1962 (спів-автор — В. А. Березовський).
- Москаленко Ю. Е., в кн. «Электроника в медицине», 1960, с. 207.
- Пресман А. С., Успехи соврем. биологии, т. 41, № 1, 1956, с. 40; Бюлл. exper. биол. и мед., № 2, 1957, с. 51; Биофизика, т. 6, № 3 1961, с. 370; Успехи соврем. биологии, т. 56, в. 2, 1963, с. 14.
- Тягин Н. В., О биол. действии СВЧ-электромагнитного поля, 1957, с. 9.
- Шаталова Г. С., Белицкая Ф. С., Физиотерапия, 1, 1941, с. 45.
- Boyle N. C., Cook H. F., Buchanan T. I., Brit. J. Phys. Med., 13, 2, 1950, p. 27.
- Cook H. F., Brit. J. Appl. Phys., 2, 10, 1951, p. 295; 3, 1, 1952, p. 1.
- Hirsch F. G., IRE Trans. Med. Electronics, v. PGME-4, 1956, p. 22.
- Roberts J. E., Cook H. F., Brit. J. Appl. Phys., 3, 2, 1952, p. 33.
- Salisbury W. W., Clark I. N., Hines H. M., Electronics, 22, 1949, p. 66.
- Schwan H. P., Kam Li, IRE Trans. Med. Electronics, v. PGME-4, 1956, p. 1572.
- Schwan H. P., Piersol G. M., Amer. J. Phys. Med., v. 33, 6, 1954, p. 371; v. 34, 1955, p. 425.
- Worden F. H., Herrick I. F., Leden U. M., Wakim K. G., Arch. Phys. Med., v. 29, 1948, p. 751.

Надійшла до редакції  
13.I 1964 р.

### Распределение тепла и величина теплового эффекта при воздействии СВЧ-электромагнитного поля на животных

В. И. Мирутенко

Лаборатория биофизики Института физиологии  
им. А. А. Богомольца Академии наук УССР, Киев

#### Резюме

Были проведены опыты в целях изучения влияния кровообращения на распределение тепла и величину теплового эффекта при воздействии сверхвысокочастотного электромагнитного поля с длиной волны 3 см. Для разрешения этой задачи измерялась температура в облученных участках тканей животного при нормальном и нарушенном кровообращении (крысы умертвлялись воздушной эмболией).

Опыты проведены при интенсивности СВЧ-поля  $0,22 \text{ вт/см}^2$  и длительности облучения от 15 до 20 минут.

При общем облучении животного СВЧ-полем на распределение тепла в органах и тканях оказывает существенное влияние наличие кровообращения и его изменение при облучении.

В тканях с нарушенным кровотоком тепловой эффект при воздействии СВЧ-поля всегда больше теплового эффекта в тканях с нормальным кровоснабжением.

При местном облучении отдельных органов животного (конечностей или головы) на протяжении 15—20 минут СВЧ-полем интенсивностью  $0,22 \text{ вт/см}^2$  температура оттекающей от облученного органа крови повышается на  $1\text{—}1,5^\circ \text{C}$ .

### Effect of Blood Circulation on the Distribution of Heat and the Magnitude of the Thermal Effect during Action of a Superhigh-frequency Electromagnetic Field on Animals

V. I. Mirutenko

Laboratory of biophysics of the A. A. Bogomoletz Institute of Physiology of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kiev

#### Summary

Experiments were conducted on the effect of blood circulation on heat distribution and the magnitude of the thermal effect during the action of a superhigh-frequency electromagnetic field with a wavelength of 3 cm. To solve this problem the temperature was measured in the irradiated area of the animal's tissues with normal and disturbed blood circulation (the rats were killed by air emboly).

The experiments were conducted with an intensity of the superhigh-frequency field of  $0,22 \text{ w/cm}^2$  and duration of irradiation of 15 to 20 minutes.

With total body irradiation of the animal with a superhigh-frequency field the heat distribution in the organs and tissues is substantially affected by the presence of blood circulation and its change during irradiation.

In tissues with disturbed circulation the thermal effect due to the superhigh-frequency field is always greater than that in tissues with normal circulation.

During local irradiation of separate organs of the animal (legs or head) during 15—20 minutes with a superhigh-frequency field of intensity  $0,22 \text{ w/cm}^2$  the temperature of the blood flowing off from the irradiated organs rises by  $1\text{—}1,5^\circ \text{C}$ .

### Про участь в механіз

Український н

В літературі про хімічний, м на організм (І. тес, 1936; Лема

Поодинокі п тивної нервової мов і В. С. Лук

нальний стан вег роботи зазнають електроенцефало

Зміни вищої впливу ультразву А. С. Мелькумова

Ми поставили вегетативної нерв всмоктування в ш шести собаках з і собаках з ізольов поставлено понад тодом варіаційної

Для зміни функції вували стрихнін і хлор 1,0 мл підшкірно, а хл впливу на ретикулярну 3 і 5 мг/кг. Вплив на барбамілу.

Для впливу на функції вались атропіном і ефект здійснювався за допомогою Собакам вагою 15-токсину — 0,5 мг, карбо-об'ємі 0,5 мл. Гексоній і 0,06 мг/кг.

Про всмоктувальну активність всмоктування і розчинні на 60 хв, а в і