

УДК 615. 471.03

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОНІТОРИНГУ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ ЛЮДИНИ ПРИБИ КОМП'ЮТЕРНІЙ ТОМОГРАФІЇ*Рудий О. Д., Терещенко М. Ф.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: alexeyrudoy1998@gmail.com, agfarkpi@i.ua*

Рентгенодіагностичні методи візуалізації внутрішніх органів людини мають багато переваг порівняно з іншими методами, оскільки їх застосування не потребує багато часу, і вони широко доступні, що дозволяє лікарям швидко підтвердити чи виключити діагноз з більшою впевненістю. Основною проблемою, що пов'язана з широким розповсюдженням радіологічної діагностики та терапії, є значне опромінення пацієнтів. За останні 30 років середня доза опромінення населення та пацієнтів збільшилася вдвічі, незважаючи на те, що опромінення від природних факторів залишилося майже на тому самому рівні. Зростання рівня середньої дози опромінення населення і пацієнтів медичних установ пов'язане із зростанням кількості діагностичних процедур, незважаючи на те, що рівень опромінення при кожній процедурі суттєво зменшився. Особливо це актуально в даний період коронакризи – стрімкого зростання кількості хворих людей, викликаного вірусом Covid-19.

У роботі розглядаються принципи моніторингу рівня доз опромінення в діагностичних та терапевтичних комплексах лікувальних закладів. Було проведено аналіз методики дослідження, порівняння доз отриманих експериментально, при яких проводились багатофакторні вимірювання дозиметрами розміщеними в зонах основних життєво важливих органів та доз, що прийняті протоколами лікування за державними та санітарними правилами і нормами.

Після проведеного аналізу і виділення основних проблем опромінення, був запропонований метод автоматизованого вимірювання доз опромінення з встановленням високоточних детекторів та алгоритм розрахунку параметрів опромінення, згідно з місцем перебування пацієнтів та персоналу під час проходження діагностичної чи терапевтичної процедури, а також, окремо для кожного органу, методика оцінки накопичення рівня доз опромінення.

Ключові слова: дозиметрія; комп'ютерна томографія; моніторинг доз опромінення.

Вступ

Оцінка опромінення працівників медичних закладів є значущою та актуальною проблемою на сьогоднішній день. Ефективність захисту рентгенлаборантів суттєво залежить від розповсюдження гамма променів навколо працюючої рентгенодіагностичної апаратури (РДА), їх інтенсивності та впливу на системи органів. Необхідність аналізу основних шляхів перевищення значення радіаційного виходу рентгенівського випромінювача, поля поширення іонізуючого випромінювання, що описується флюенсом – кількістю часток, що потрапляють на площину поперечного перерізу об'єму органу, який знаходиться під впливом іонізуючого випромінювання, та енергетичним спектром, є першочерговою необхідністю для визначення та підтримання належного рівня ефективної дози, під час процедури, та забезпечення надійного контролю для запобігання перевищення еквівалентної дози. Дози окремих органів у людських тілах були виміряні під час сканування комп'ютерним томографом (КТ) всього тіла, голови, грудної клітини і черевної порожнини з використанням вимог клінічних протоколів та запропонованої нами методики моделювання та обробки отриманих експериментальних результатів [1 – 3].

Процес підготовки моніторингу та отримання вимірів

Вимірювальні сенсори дозиметрів були імплантовані хірургічним втручанням в окремі органи людських тіл, включаючи зону кришталика ока, щитоподібну залозу, легені, печінку, нирки і статеві органи. Комп'ютерне сканування (КС) тіл було проведено під час різних сеансів діагностики шляхом моделювання, з дотриманням загальноприйнятих клінічних протоколів та рекомендованих методів дослідження чи лікування. Після сканування сенсори дозиметрів були вилучені, а потім на підґрунті отриманих ними значень були розраховані дози опромінення для кожного органу.

Для визначення рівня значень експозиційної дози було використано сенсори дозиметрів з оптично стимульованою люмінесценцією (OSL), які мають високу часову стабільність і широко застосовуються для вимірювання і контролю значень індивідуальних доз опромінення медичного персоналу [4]. Головною перевагою даного типу дозиметрів є їх незначне поглинання іонізуючого випромінювання. Тобто дозиметри практично не впливають на параметри потоку рентгенівського випромінювання, що виникає при КТ-скануванні. Всього для розміщення сенсорів OSL дозиметрів

було вибрано 11 місць: правий головний мозок, правий кришталик, щитоподібна залоза, ліва легеня, права частка печінки, ліва нирка, спадна частина дванадцятипалої кишки, низхідна ободова кишка, права гонада, шкіра над правим соском і пупок (рис. 1). Ці місця і органи були обрані в порядку захисного пріоритету з урахуванням їх чутливості до радіаційного опромінення.

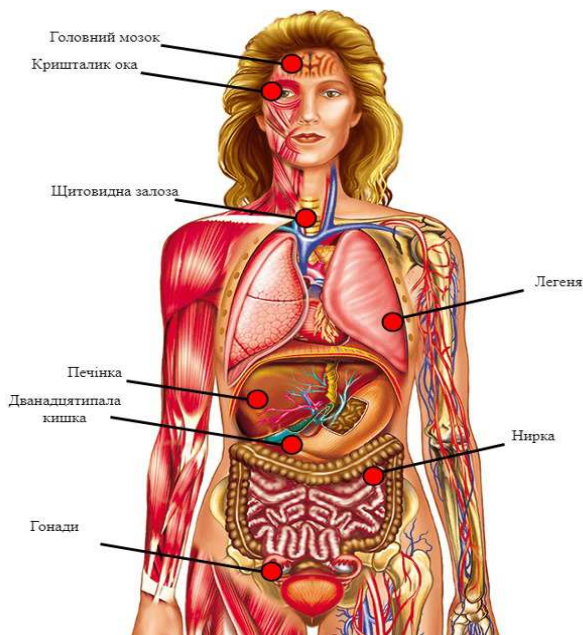


Рис. 1. Зони позиціонування детекторів [1]

Таблиця 1. Налаштування випромінювальної системи

	Сканування всього тіла	Сканування голови	Сканування грудної клітини	Сканування черевної порожнини
Напруга трубки, кВ	130	130	110	130
Струм трубки, мАс	100	220	15	100
Фактор висоти тону	0,8	0,55	1,5	0,8
Колімація променя, мм	16 × 0,6	16 × 0,6	16 × 0,6	16 × 1,2
Час обертання, с	0,6	1,5	0,6	0,6
Поле зору, мм × мм	1300 × 500	160 × 210	400 × 370	400 × 350

Потужність P такої поглиненої дози визначається, як відношення поглиненої D_n дози за одиницю часу t

$$P = D_n / t. \quad (2)$$

Тоді значення узагальненої інтегральної D_{int} поглиненої дози відповідає повній кількості поглиненої енергії фотонів у даній m масі за час t

$$D_{int} = P \cdot m \cdot t. \quad (3)$$

Для практичної оцінки впливу на організм чи його частину використовують еквівалентну дозу:

$$D_{екв} = D_n \cdot K_T, \quad (4)$$

де K_T – коефіцієнт якості даного виду випромінювання з урахуванням конкретної біологічної тканини.

Після розрахунку були отримані значення змодульованих доз опромінення органів (Рис. 3).

Усі радіаційні впливи на окремі органи тіла були досліджені за допомогою 16-зрізового мультidetекторного комп'ютерного томографа (КТ). Для аналізу було проведено сканування всього тіла, голови, груднини та черевної порожнини в положенні лежачи на спині. Параметри налаштування випромінювальної системи КТ представлені у таблиці 1 [1, 4, 5].

Аналіз отриманих значень опромінення органів людини

При скануванні комп'ютерним томографом усього тіла людини середні значення доз на окремі органи були наступними: головний мозок 14,33 мГр, кришталик 13,22 мГр, щитоподібна залоза 19,57 мГр, легені 15,53 мГр, печінка 15,68 мГр, нирки 12,04 мГр, дванадцятипала кишка 17,58 мГр, дванадцятипала кишка 14,56 мГр, гонади (яєчка 15,62 мГр, яєчники 14,26 мГр), шкіра сосків 13,97 мГр і шкіра пуповини 19,44 мГр [1]. Отримані графіки для усіх досліджень кожного відділу представлено на рис. 2.

Щоб порівняти експериментальні результати [1] з контрольними значеннями, були розраховані дози на органи при кожному скануванні КТ з використанням прийнятих формул розрахунку доз. Знаючи усі налаштування системи КТ, можна обчислити поглинену дозу D_n випромінювання:

$$D_n = W / (V \cdot m), \quad (1)$$

де W – енергія випромінювання, що поглинена в V об'ємі з m – масою.

При загальному скануванні всього тіла середні значення дози для органів тіла були наступними: головний мозок 17,5 мГр, кришталик 16,15 мГр, щитоподібна залоза 26,56 мГр, легені 16,92 мГр, печінка 17,18 мГр, нирки 16,72 мГр, дванадцятипала кишка 17,99 мГр, гонади 23,34, шкіра 17,9 мГр [1].

Отже, як видно з графіків, середні значення змодульованих доз на окремі органи при кожному скануванні КТ були відносно вище, ніж значення дози на конкретні органи, виміряні при прямому, цільовому КТ-скануванні. Проте, важливо врахувати що при діагностиці однієї частини органів під опромінення потрапляють і інші частини тіла. Для цього запропоновано використовувати автоматизовану систему вимірювальних детекторів [5 – 7].

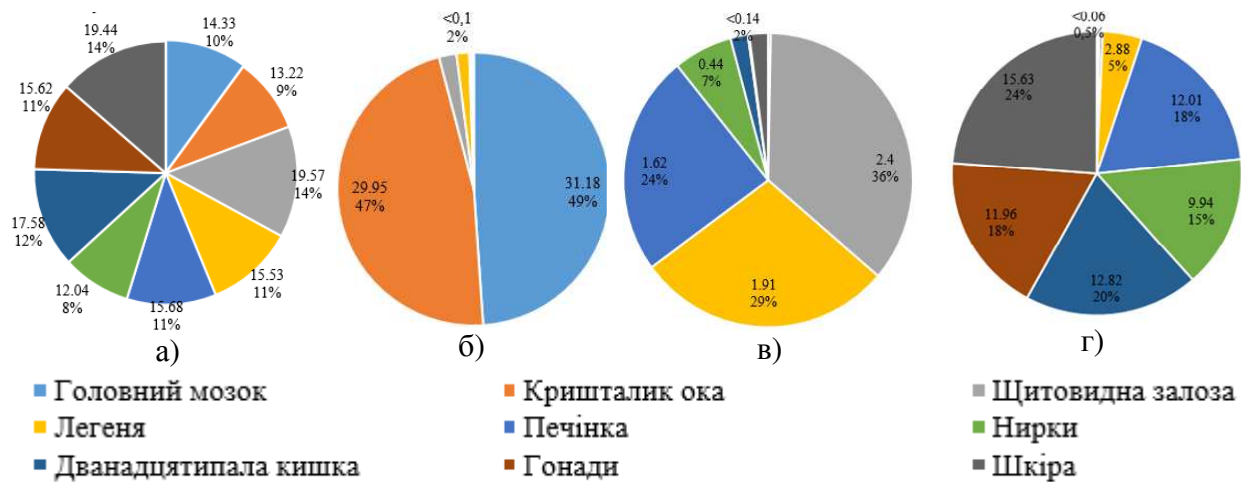


Рис. 2. Середні значення вимірювальної дози на окремі органи при різних режимах сканування та їх відсоткові значення в загальній дозі опромінення: а) всього тіла, б) голови, в) грудини, г) черевної порожнини

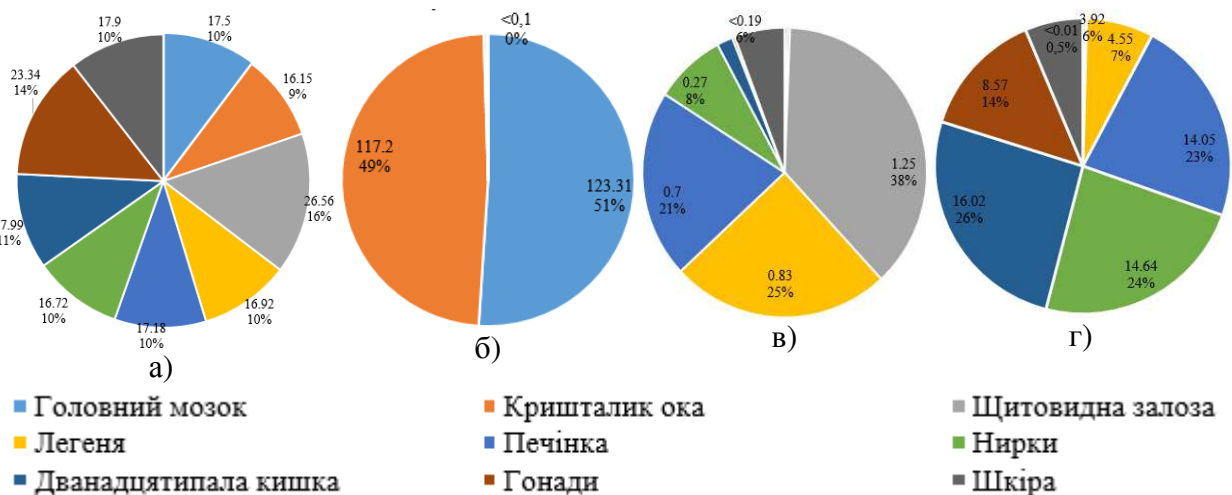


Рис. 3. Змодульовані середні значення вимірювальної дози на окремі органи за різних режимів сканування: а) всього тіла, б) голови, в) грудини, г) черевної порожнини

Структурна схема комплексної системи дозиметрії

Значення встановленої дози опромінення на пульті керування РДА та фактичне значення поглиненої дози можуть не бути однаковими через неправильне або несвоєчасне калібрування генератора високої напруги. Важливо саме реальне значення дози, яку отримали опромінені органи пацієнтів. Для цього використовується додаткова система дозиметричного контролю. Структурна схема комплексної модифікованої системи в складі рентгенодіагностичного комплексу з використанням дозиметрів та датчиків приведена на рис. 4.

Така система дозволяє істотно зменшити дозові навантаження із суттєвим зростанням діагностичних можливостей. Для забезпечення моніторингу та підвищення точності підтримки заданих значень енергетичних і радіаційних параметрів іонізуючого випромінювання під час діагностичної або терапевтичної процедури із забезпеченням

необхідного рівня безпеки тканин застосовується контроль енергетичних і радіаційних параметрів джерел іонізуючого випромінювання. Для цього використовуються датчики контролю енергетичних і радіаційних параметрів і вимірювачі енергетичних та радіаційних характеристик, що розміщуються відповідно до місця знаходження вищезгаданих органів.

Зареєстровані значення енергетичних і радіаційних параметрів іонізуючого випромінювання датчиками (13) передаються в вимірювачі енергетичних та радіаційних характеристик (14). З вимірювачів (14) поточні дані енергетичних параметрів U_w , I_a та радіаційних J_w , D_n , P , D_{int} , $D_{екв}$ передаються в блок керування (5), де порівнюються із заданими та нормованими їхніми значеннями. При невідповідності поточних значень нормованим відбувається регулювання параметрів променевого випромінювача (10-1). Вимірювачі енергетичних і радіаційних характеристик (14) з'єднані з блоками

керування (5), температурного контролю (7), променевого випромінювача (10-1) та приймачів

тіньового зображення (10-2), датчиків контролю енергетичних і радіаційних параметрів (13) [9, 10].

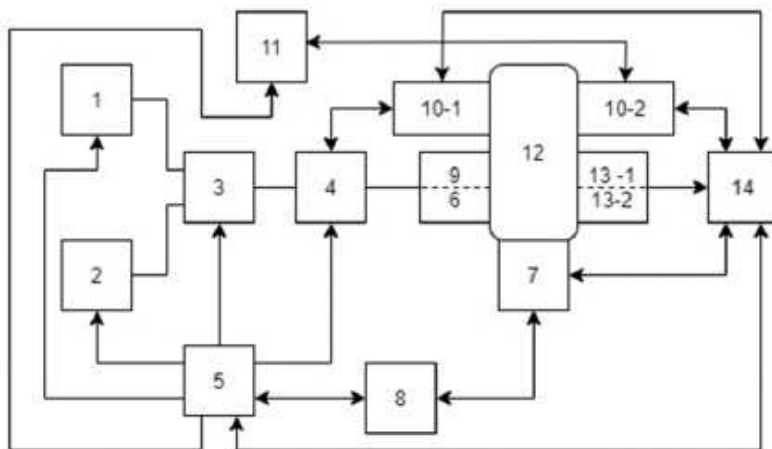


Рис. 4. Комплексна система діагностики та терапії: 1, 2 – високочастотний і низькочастотний генератори; 3 – модулятор; 4 – підсилювач потужності; 5 – блок керування; 6 – ультразвуковий випромінювач; 7 – датчик температур; 8 – блок температурного контролю; 9 – датчик ультразвукового дослідження; 10 – система променевої діагностики; 11 – монітор; 12 – досліджуваний об’єкт; 13 – датчики контролю енергетичних і радіаційних параметрів; 14 – вимірювачі енергетичних і радіаційних характеристик

Розв’язання задачі зменшення доз опромінення, шляхом моніторингу найбільш вразливих зон в тілі людини при діагностиці та терапії окремих органів досягається використанням датчиків контролю енергетичних і радіаційних параметрів (13), вимірювачів енергетичних та радіаційних характеристик (14), які заміряють значення енергетичних і

радіаційних параметрів до та під час проведення променевої діагностики та терапії. Залежно від отриманих значень параметрів та індивідуальної чутливості окремих тканин і органів корегують значення анодної напруги, струму та часу експозиції випромінювача за алгоритмом, наведеним на рис. 5.



Рис. 5. Алгоритм програми для встановлення доз опромінення окремих органів під час діагностики та терапії [9]

Алгоритм протестований для уявного органу тіла людини, максимальне опромінення якого складає до 1000 мкР/год. Отже, такий алгоритм дозволяє окремо проводити високоточний моніторинг та контролювати значення доз опромінення окремих частин тіла не наражаючи на небезпеку пацієнта, а також виключити можливість виникнення онкологічних захворювань, пов'язаних з надлишковим опроміненням [10, 11].

Висновки

В ході дослідження та при аналізі значень доз опромінення органів було проведено моделювання та виявлено, що при діагностиці або лікуванні окремих органів інші органи отримують пасивне опромінення іонізуючим випромінюванням. При недостатній захищеності та відсутності запропонованого моніторингу можливе виникнення злоякісних утворень, що перетворює найточніший метод діагностики на суттєву загрозу надлишкового опромінення.

Література

- [1] Kazuta Yamashita, et al. "Direct measurement of radiation exposure dose to individual organs during diagnostic computed tomography examination," *Scientific reports*, vol. 11, no. 1, pp. 5435, 2021. doi:10.1038/s41598-021-85060-5
- [2] M. Nowak, P. Carbonez, M. Krauss, F.R. Verdun, J. Damet, "Characterisation and mapping of scattered radiation fields in interventional radiology theatres", *Sci Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 18754, 2020. doi: 10.1038/s41598-020-75257-5.
- [3] Н. Ф. Терещенко, П. А. Усачев, Е. Ю. Григорьева, "Влияние ионизирующего излучения на человека и его использование в медицине", *Опτικο-електронные информационно-енергетические технологии*, Т. 17, № 1(1), с. 154–159, 2009.
- [4] О. Д. Рудий, М. Ф. Терещенко, "Автоматизована медична система моніторингу доз гамма випромінювання", на *III Міжнар. наук.-техн. конф. Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування*, Харків, 2020, с. 80-81.
- [5] О. Д. Рудий, М. Ф. Терещенко, "Принципи моніторингу рівня експозиційної дози в рентгено-

діагностиці", на *XIII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених Погляд у майбутнє приладобудування*, Київ, 2020, с. 228–232.

- [6] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [7] K. S. Wilson-Stewart, D. Fontanarosa, Li, D., C. C. Drovandi, R. K. Anderson, & J. V. Trapp, "Taller staff occupationally exposed to less radiation to the temple in cardiac procedures, but risk higher doses during vascular cases", *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020, p. 16103.
- [8] Y. Danan, D. Avraham, and Z. Zalevsky, "Reduction in Irradiation Dose in Aperture Coded Enhanced Computed Tomography Imager Using Super-Resolution Techniques," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6551, 2020. doi: 10.3390/s20226551
- [9] L. Yu, M. R. Bruesewitz, K. B. Thomas, J. G. Fletcher, J. M. Kofler, C. H. McCollough, "Optimal tube potential for radiation dose reduction in pediatric CT: principles, clinical implementations, and pitfalls", *Radiographics*, vol. 31, no 3, pp. 835-848. doi: 10.1148/rg.313105079.
- [10] Paul Oakley, & Deed Harrison, "X-Ray Hesitancy: Patients' Radiophobic Concerns Over Medical X-rays," *Dose-Response*, vol. 18, no. pp. 1-11, 2020. doi: 10.1177/1559325820959542
- [11] B. F. Wall, G. M. Kendall, A. A. Edwards, S. Bouffler, C. R. Muirhead, J. R. Meara, "What are the risks from medical X-rays and other low dose radiation?", *Br J Radiol.*, vol. 79, no. 940, pp. 285-294, 2006. doi: 10.1259/bjr/55733882.
- [12] M. S. Linet, T. L. Slovis, D. L. Miller, R. Kleinerman, C. Lee, P. Rajaraman, & A. Berrington de Gonzalez, "Cancer risks associated with external radiation from diagnostic imaging procedures", *CA: a cancer journal for clinicians*, vol. 62, no. 2, pp. 75–100, 2012. doi:10.3322/caac.21132
- [13] H. H. Barrett, K. J. Myers, C. Hoeschen, M. A. Kupinski, M. P. Little, "Task-based measures of image quality and their relation to radiation dose and patient risk", *Phys Med Biol.*, vol. 60, no. 2, pp. R1-R75, 2015. doi:10.1088/0031-9155/60/2/R1

УДК 615. 471.03

А. Д. Рудий, Н. Ф. Терещенко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Рентгеновские методы визуализации внутренних органов человека имеют много преимуществ по сравнению с другими методами, поскольку их применение не требует много времени, и они широкодоступны, что позволяет врачам быстро подтвердить или исключить диагноз с большей уверенностью. Основной проблемой, связанной

с широким распространением радиологической диагностики и терапии, является значительное облучение пациентов. За последние 30 лет средняя доза облучения населения и пациентов увеличилась вдвое, несмотря на то, что облучение от природных факторов осталось почти на том же уровне. Рост уровня средней дозы облучения населения и пациентов медицинских учреждений связан с ростом числа диагностических процедур, несмотря на то, что уровень облучения при каждой процедуре существенно уменьшился. Особенно это актуально в период коронакризиса – стремительного роста количества заболевших людей, – вызванного вирусом Covid-19.

В работе рассматриваются принципы мониторинга уровня доз облучения в диагностических и терапевтических комплексах лечебных учреждений. Был проведен анализ методики исследования, сравнение доз, полученных экспериментально, при которых проводились многофакторные измерения дозиметрами, размещенными в зонах основных жизненно важных органов и доз, принятых протоколами лечения по государственным и санитарным правилам и нормам.

После проведенного анализа и выделения основных проблем облучения, был предложен метод автоматизированного измерения доз облучения с установлением высокоточных детекторов и алгоритм расчета параметров облучения, согласно места пребывания пациентов и персонала во время прохождения диагностической или терапевтической процедуры, а также отдельно для каждого органа, методика оценки накопления уровня доз облучения.

Ключевые слова: дозиметрия; компьютерная томография; мониторинг доз облучения.

A. D. Rudoy, M. F. Tereshchenko

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine*

THE EFFICIENCY ESTIMATION OF MONITORING THE HUMAN RADIATION DOSES DURING COMPUTED TOMOGRAPHY

X-ray imaging techniques have many advantages over other methods because they can be easily performed in a short time and are widely available, allowing doctors to quickly confirm or rule out a diagnosis with greater confidence. The main problem associated with the widespread use of radiological diagnosis and therapy is the significant exposure of patients. Over the last 30 years, the average radiation dose of the population and patients has doubled, despite the fact that exposure to natural factors has remained almost at the same level. The increase in the level of the average radiation dose of the population and patients of medical institutions is associated with an increase in the number of diagnostic procedures, despite the fact that the level of radiation with each procedure has decreased significantly. This is especially true in this period of coronary crisis - a rapid increase in the number of human diseases caused by the Covid-19 virus.

The paper considers the principles of monitoring the level of radiation doses in diagnostic and therapeutic complexes of medical institutions. The analysis of research methods, comparison of doses obtained experimentally, in which multi-factor measurements were performed with dosimeters located in the areas of major vital organs and doses adopted by treatment protocols according to state and sanitary rules and regulations.

After the analysis and identification of the main problems of irradiation, a method of automated measurement of radiation doses with the installation of high-precision detectors and an algorithm for calculating irradiation parameters, according to the location of patients and staff during diagnostic or therapeutic procedures, as well as separately for each body, method assessment of the accumulation of the level of radiation doses.

Key words: dosimetry; computed tomography; radiation dose monitoring.

*Надійшла до редакції
5 квітня 2021 року*

*Рецензовано
21 квітня 2021 року*