

УДК 616-073.756.8:615.849

Дорош А. М., Стадник Л. Л., Авер'янова Л. О., **Роговец В. Є.**

## СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДОЗОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПАЦІЄНТА ПРИ КОМП'ЮТЕРНІЙ ТОМОГРАФІЇ У МЕДИЧНИХ УСТАНОВАХ УКРАЇНИ

*Розглянуто питання контролю дозових навантажень на пацієнтів при рентгенівській комп'ютерній томографії (КТ) в Україні. Виявлено, що у багатьох країнах світу зростає поширеність сучасних технологій КТ-діагностики, проте саме вони спричиняють найбільше променеве навантаження на пацієнта. З метою моніторингу колективної дози від КТ в межах держави в розвинених країнах проводиться ретельний збір статистичних даних про КТ-дослідження. В Україні системний моніторинг колективної дози КТ досі не здійснюється, що порушує вимоги Міжнародної комісії з радіаційного захисту. Перспективним рішенням цієї проблеми є створення загальнодержавної бази статистичних даних щодо КТ-діагностики.*

*Проведено аналіз даних Всеукраїнського аудиту КТ щодо кількості КТ-систем на території країни станом на 2019 рік. За отриманими даними було проведено порівняння даних Державної інспекції ядерного регулювання України (ДІЯР) та МОЗ України щодо використання КТ у країні. Виявлено суттєві розбіжності у кількості КТ-систем, що свідчить про відсутність єдиних підходів до обліку та моніторингу КТ в Україні.*

*Розглянута типова процедура контролю рівнів дози при опроміненні під час основних рентгенологічних досліджень. Виявлено основні чинники формування індексу дози при інтервенційній та спіральній КТ. Розглянуто можливості зниження дозового навантаження на пацієнта завдяки зміні режимів мультиспірального КТ-сканування. Для отримання референтних значень індексу дози при спіральній КТ було проведено сканування дозиметричного рентген-антропоморфного фантому.*

*Отримані результати можна застосовувати при обробці даних аудиту КТ, для чого запропоновано форму анкети, яка містить параметри протоколу КТ-дослідження та результати вимірювань і розрахунків з метою подальшої системної оцінки колективної дози при КТ в Україні.*

**Ключові слова:** комп'ютерна томографія (КТ), доза опромінення, індекс дози КТ, ефективна доза, пітч.

**Постановка проблеми.** В останні роки потреба в проведенні комп'ютерної томографії (КТ) значно збільшилася в усьому світі. З появою сучасних багатозрізових комп'ютерних томографів рентгенологічні методи дослідження вийшли на принципово новий рівень у зв'язку з можливістю отримувати уявлення про реальний морфофункціональний стан досліджуваних тканин і органів. У той же час відомо, що внаслідок опромінення при КТ зростає ризик виникнення злоякісних новоутворень, особливо у дітей. Отже, контроль колективної дози при КТ та пошук шляхів її обмеження є пріоритетною задачею медичної радіології [1-4]. Щодо кількості КТ-систем та їх технічного стану в Україні дані є неповними, отже, фактично немає можливості оцінити та контролювати колективну дозу опромінення пацієнтів від КТ у межах держави. Це призводить до неможливості виконання вимог основоположних документів Міжнародної комісії з радіаційного захисту. Тому створення в Україні загальнодержавної системи контролю доз при КТ є вельми актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У всіх країнах спостерігається зростання поширеності КТ-діагностики [2-5]. Протягом багатьох років ведеться збір статистичних даних щодо кількості КТ-сканерів на 1 млн населення: наприклад, станом на

2017 рік в Австралії їх була найбільша кількість - 64,35 сканерів/млн чол., друге місце посідала Ісландія з 44,33 сканерами/млн чол. [1]. Проте відомо, що КТ спричиняє найбільше променеве навантаження на пацієнта порівняно з усіма іншими променевими методами. Так, у США частка загальнодержавної колективної дози опромінення за рахунок КТ складає 24 % [2]. У Німеччині при 7 % частці КТ-досліджень формується 54 % колективної дози опромінення від усіх радіологічних досліджень [3]. Щодо України таких даних поки немає.

Колективна доза опромінення внаслідок КТ може бути встановлена за наявності повної інформації щодо КТ-досліджень у межах країни. Кожне таке дослідження характеризується певним набором технічних та дозиметричних параметрів.

Для контролю рівнів дози при опроміненні основних рентгенологічних дослідженнях пацієнтів середнього зросту і маси тіла встановлюють два дозиметричних параметра - *CTDI* (індекс дози) та *DLP* (ефективна доза). Ці дані завжди входять до протоколу сканування [4].

Індекс дози КТ (*CTDI*) являє собою спеціальну величину дози, яка широко використовується для визначення поглиненої дози при КТ [4]. Відомо, що при КТ рентгенівський промінь обертається навколо пацієнта і проходить з усіх боків. Це дає приблизно однакову картину поглиненої дози в кожному зрізі. Значення дози, яке визначається в центрі зрізу, зазвичай вважається гарним показником дози в тканині і може використовуватися для порівняння методів візуалізації та для корегування дози. Одним з ускладнюючих чинників при визначенні дози КТ є те, що тканина в зрізі піддається впливу двох джерел рентгенівського випромінювання. Один - прямий промінь, а інший - розсіяне випромінювання від сусідніх зрізів в типовій процедурі формування зображень з декількома зрізами. Внесок розсіяного випромінювання дуже важко виміряти.

Типова процедура вимірювання полягає в наступному. Дозиметр в формі «олівця» (іонізаційна камера) знаходиться в фантомі. Потім сканується тільки один повний зріз і значення дози зчитується. Дозиметр буде зчитувати випромінювання від прямого рентгенівського променя всередині зрізу плюс розсіяне випромінювання, що виходить з боків зрізу і доходить до дозиметра. Щоб визначити *CTDI*, доза радіації від КТ вимірюється іонізаційною камерою довжиною 100 мм, потім інтегрована доза нормалізується до номінальної ширини променя. Отже, *CTDI* - це не доза на точку, а середня доза у об'ємі. Хоча *CTDI* вимірюється за допомогою одиничного аксіального сканування, його можна використовувати для оцінки середньої дози від декількох сканувань [4].

$$CTDI = \frac{1}{N \cdot T} * \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(z) dz, \text{ де} \quad (1)$$

$N$  – кількість томографічних зрізів;  $T$  – товщина томографічного зрізу;  $K_a$  – профіль радіаційної дози уздовж осі  $z$ .

З появою спіральних комп'ютерних томографів вводиться інша величина  $CTDI_{100}$  як більш повне визначення дози, ніж традиційна *CTDI* (рис. 1).

У випадку  $CTDI_{100}$  визначається інтеграл профілю дози, одержуваної при одиничному аксіальному скануванні (поворот рентгенівської трубки на  $360^\circ$ ) вздовж лінії, перпендикулярної до томографічної площині в діапазоні  $\pm 50$  мм з центрованим профілем дози відносно  $z = 0$ . Усе це розраховано на наявність іонізаційної камери довжиною 100 мм та двох стандартних *CTDI*-акрилових фантомів.

$$CTDI_{100} = \frac{1}{N \cdot T} * \int_{-50\text{мм}}^{+50\text{мм}} K_a(z) dz, \quad (2)$$

Для проведення тесту необхідні: дозиметричні плексигласові фантоми голови (діаметр 16 см) і тулуба (діаметр 32 см) шириною не менше 14 см з отворами в центрі і

чотирьох периферичних точках на  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  і  $270^\circ$  на відстані 1 см від краю; іонізаційна камера діаметром близько 1 см, довжиною близько 14 см і активною зоною довжиною 10см; дозиметр для вимірювання *CTDI* (рис. 2).

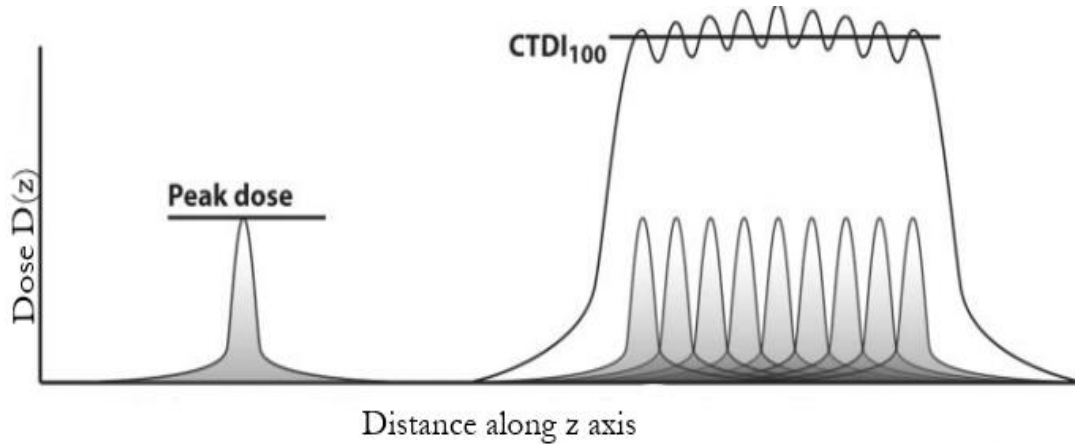


Рисунок 1 – Визначення індексу дози при інтервенційній та спіральній КТ

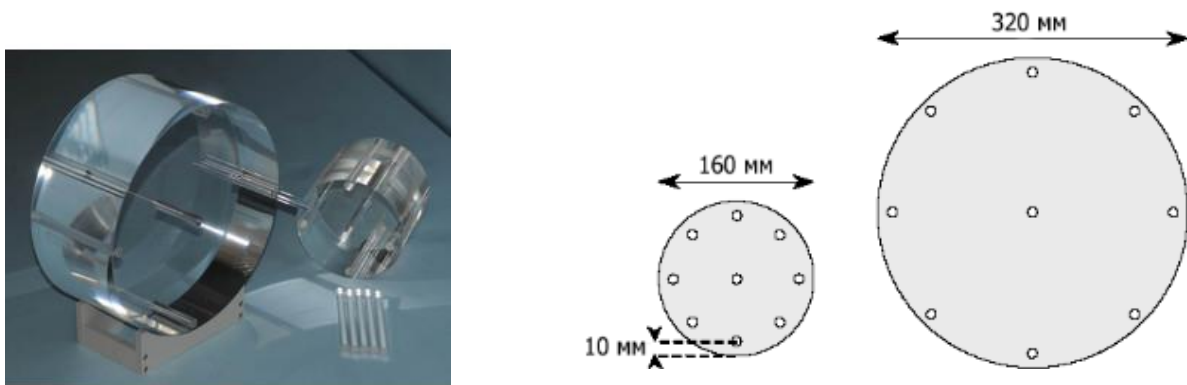


Рисунок 2 – Фантоми для перевірки індексу дози КТ

Загальна енергія випромінювання, що поглинається тілом пацієнта, може бути оцінена шляхом множення дози всередині зрізу на відстань (довжину) сканування уздовж тіла. Перевага визначенню ефективної дози (*DLP*) полягає в тому, що її відносно легко визначити для кожного пацієнта. *DLP* використовується для оцінки відносного ризику для пацієнта, беручи до уваги розподіл значень дози для різних органів і анатомічних областей.

Ефективна доза – це сума всіх вагових поглинутих доз в органах та тканинах людини. Розраховується з урахуванням вагових коефіцієнтів для різних видів випромінювань, характеризує їх проникну здатність та є мірою біологічного ризику опромінення при КТ-дослідженнях і розраховується з *DLP* з використанням коефіцієнта перерахунку.

Обидва параметра (*CTDI* та *DLP*) використовуються в Європейському Союзі для встановлення діагностичних контрольних рівнів доз опромінення для основних видів КТ-досліджень. Наприклад, при КТ грудної клітки *CTDI<sub>w</sub>* (ваговий індекс дози) становить 30 мГр, *DLP* – 650 мГр\*см. Системне перевищення діагностичних контрольних рівнів потребує негайних заходів зі зниження доз опромінення пацієнтів.

**Обговорення.** Станом на 2019 рік в Україні за участі провідних фахівців Інституту медичної радіології ім. С. П. Григор'єва НАМН України був проведений Всеукраїнський аудит щодо наявності КТ-систем на території країни. За отриманими даними була проведена оглядова характеристика кількості КТ у країні за даними ДІЯР (Державна інспекція ядерного регулювання України) та МОЗ України (Рис.3). При порівнянні даних ДІЯР та МОЗ було виявлено, що дані суттєво різняться між собою. За даними ДІЯР на території України знаходиться 525 систем КТ, а за даними МОЗ їх 103. Можливо, ця різниця спричинена стрімким зростанням кількості КТ-систем у приватних та відомчих медичних установах, дані про які не в повному обсязі наявні в МОЗ. Аудит КТ ускладнюється тим, що на території України не створена загальна база даних, у якій містилися би відомості про технічні характеристики КТ-систем, дані про виробника, рік виготовлення тощо. Проведено також аналіз даних щодо фірм-виробників КТ-систем, наявних на території України станом на 2019 рік за даними ДІЯР (рис. 4). Очевидно, що ці КТ-системи можуть мати різні технічні характеристики та навіть належати до різних поколінь томографів. В той же час без наявності повної інформації про модель КТ-системи та параметри сканування об'єктивно оцінити дозове навантаження на пацієнта неможливо.

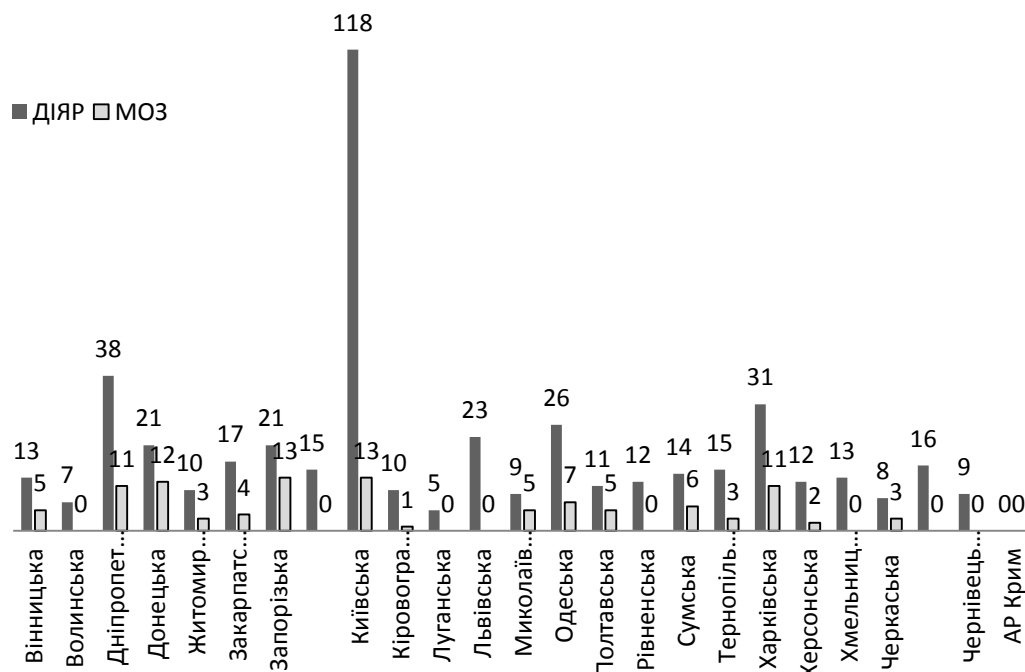


Рисунок 3 – Порівняння кількості КТ в Україні за даними ДІЯР та МОЗ на 2019 рік

Також на території країни проводився аудит стосовно КТ-обстежень хворих на 2019 рік. До даних, які потрібно було надати, входили параметри стандартного протоколу дослідження хворого за допомогою КТ [4].

При розгляді матеріалів аудиту стосовно визначення індексу дози КТ (*CTDI*) було виявлено, що на території України не було проведено всеосяжних досліджень стосовно визначення *CTDI*, хоча багато країн їх здійснили (США, Канада, Єгипет та ін.) [5, 6]. При аналізі даних аудиту КТ відносно обстежень пацієнтів по Україні виявились такі проблеми:

- не всі заклади відправили заповнені анкети;
- не всі КТ-системи мають стандартизовану базу для визначення *CTDI* та *DLP*;

Біоінженерія

- не всі наявні анкети заповнені відповідно до протоколу.

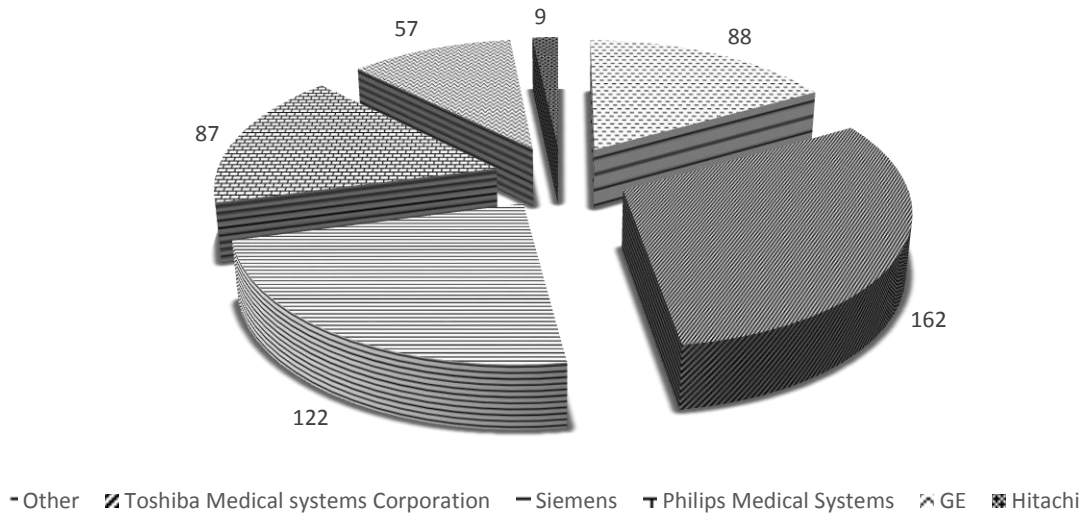


Рисунок 4 – Представлення фірм-виробників КТ в Україні станом на 2019 рік

При детальному аналізі наданих медичними установами розрахунків *CTDI* та *DLP* виникли сумніви відносно їх правильності. Відштовхуючись від первинного аналізу анкет, можна стверджувати, що у понад 80 % випадків було неможливо спиратися на ці дані та говорити про їх високу якість для статистичного аналізу у рамках країни.

Для отримання референтних значень *CTDI* та *DLP* при спіральній КТ згідно зі стандартним протоколом КТ-дослідження органів грудної клітки було проведено сканування дозиметричного рентген-антропоморфного фантому CIRS ATOM<sup>®</sup> модель 701, який є моделлю торсу дорослого чоловіка і складається з 39 аксіальних секцій (рис. 5). Фантом сканувався на 64-зрізовому спіральному КТ Philips Brilliance 64 (рис. 6). Параметри протоколу сканування наведені у табл. 1.

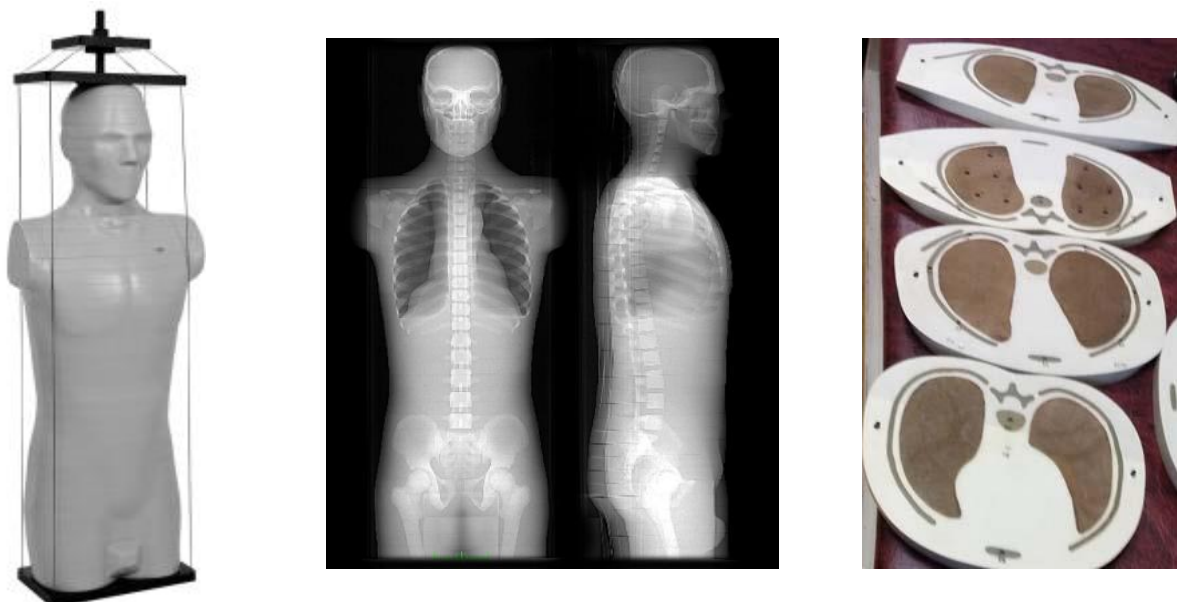


Рисунок 5 – Фантом CIRS ATOM<sup>®</sup> модель 701, його рентгенограма та окремі аксіальні секції



Рисунок 6 – Сканування фантому CIRS ATOM<sup>®</sup> модель 701 на МСКТ Philips Brilliance 64

Таблиця 1 – Результати дослідження рентген-антропоморфного фантому

Область сканування	ОГК	Технологія сканування	МСКТ
Напруга, кВ	120	Сила струму, мА	300
Час ротації, с	5,083	Довжина області сканування, см	32
Ширина зрізу, см	0.3	Зсув столу за ротацію, см	0,15
$CTDI_c$ , мГр	8,2	$DLP$ , мГр*см	4,3
		Пітч	1,015
		Швидкість обертання, об/с	2

На основі цих даних з метою ефективного та якісного автоматизованого збору інформації для визначення дозових навантажень на пацієнтів пропонується затребувати наступні необхідні параметри КТ-обстеження (Табл. 1). Це необхідно для отримання зображень з послідовними етапами візуалізації [7, 8] та аналізу даних [9].

Таблиця 2 – Загальна форма заповнення для анкетування КТ

Дані пацієнта		П.	І.	Б.	Назва закладу	
Дата проведення		Вік ___	Зріст __	Вага __	Назва КТ	
					Кількість детекторів	
Дані лікаря-рентгенолога		П.	І.	Б.	Рік випуску	
<b>Параметри протоколу проведення дослідження</b>						
	Область сканування				Технологія сканування	
	Напруга, кВ				Сила струму, мА	
	Час ротації, с				Довжина області сканування, см	
	Ширина зрізу, см				Зсув столу за ротацію, см	
	$CTDI_c$ , мГр				$DLP$ , мГр*см	

	$CTDI_p$ , мГр		Пітч	
	$CTDI_w$ , мГр		Швидкість обертання, с	
	$CTDI_{vol}$ , мГр			
	Чи проводились вимір на фантомі?		<input type="checkbox"/> Так	<input type="checkbox"/> Ні
	Назва фантома			
	<b>Результати вимірювання та розрахунки</b>			
	Дані на 0°		Дані на 90°	
	Дані на 180°		Дані на 270°	
	$CTDI_c$ , мГр		Напруга, кВ	
	$CTDI_p$ , мГр		Час ротації, с	
	$CTDI_w$ , мГр		Ширина зрізу, см	
	$CTDI_{vol}$ , мГр		Напруга, кВ	
	$DLP$ , мГр*см		Сила струму, мА	
	$E$ , мЗв		Довжина області сканування, см	
	Пітч		Швидкість обертання, с	

Накопичення та аналіз цих даних у єдиній інформаційній системі дозволить отримати інформацію, достатню для оцінки колективної дози опромінення пацієнтів при КТ в Україні, як того вимагають керівні міжнародні установи з радіаційного захисту.

### ВИСНОВКИ

У роботі наведено аналіз даних аудиту наявних КТ-систем на території України станом на 2019 рік. Проведено експериментальне дослідження формування дози при мультиспіральному скануванні рентген-антропоморфного фантому та отримано референтні значення індексів дози КТ. Для здійснення подальшого моніторингу колективної дози від КТ на території України пропонується створити єдину інформаційну систему для обліку доз КТ. Розроблену форму анкети для проведення аудиту КТ можливо рекомендувати по всій території України.

#### Список використаних джерел:

1. Computed tomography and patient risk : Facts, perceptions and uncertainties / *S. P. Power [et al.]* // World Journal Radiology. – 2016. – N 8. – P. 902–915.
2. *Field, R. W.* Radon: An Overview of Health Effects / *R. W. Field* // Encyclopedia of Environmental Health. – Second Edition. – 2015. – P. 467–475. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489095452?via%3Dihub>
3. Development and test of a new scanning geometry for Computed Tomography de las Heras, Hugo. Dissertation, 2009. – Mode of access: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=677903>
4. European Guidance on Estimating Population Doses from Medical X-Ray Procedures // Radiation Protection. – 2011. – N 154. – P. 24–34.
5. Medical Radiation Exposure of the European Population // Radiation Protection. – 2015. – N 180. – P. 51–63.

6. Establishing national diagnostic reference levels (DRLs) for computed tomography in Egypt / *Salama DH [et al.] // Physica medica.* – 2017. – N 39. – P. 16–24.
7. *Тарутин, И. Г.* Протокол контроля качества работы рентгеновских компьютерных томографов / *И. Г. Тарутин, С. А. Хоружик, Г. В. Чиж // Контроль качества в лучевой терапии и лучевой диагностике : сб. норматив. док. / сост.: Н. А. Артемова [и др.]. – Мн., 2009. – С. 92–119.*
8. *Аврунин, О. Г.* Визуализация вентролатерального ядра таламуса головного мозга человека / *О. Г. Аврунин, В. В. Семенец, С. Ю. Масловский // Радиоэлектроника и информатика.* – 1998.– № 1/(2). – С. 132–134.
9. *Аврунин, О. Г.* Определение степени инвазивности ирригического доступа при компьютерном планировании оперативных вмешательств / *О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович, Х. И. Фарук // Бионика интеллекта.* – 2013. – № 2 (81). – С. 101–104.

Дорош А. Н., Стадник Л. Л., Аверьянова Л. А.

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ПАЦИЕНТА ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЯХ УКРАИНЫ

*Рассмотрены вопросы контроля дозовых нагрузок на пациентов при рентгеновской компьютерной томографии (КТ) в Украине. Обнаружено, что во многих странах мира растет распространенность современных технологий КТ-диагностики, однако именно они оказывают наибольшие лучевые нагрузки на пациента. С целью мониторинга коллективной дозы от КТ в пределах государства в развитых странах проводится тщательный сбор статистических данных о КТ-исследованиях. В Украине системный мониторинг коллективной дозы КТ до сих пор не осуществляется, что нарушает требования Международной комиссии по радиационной защите. Перспективным решением этой проблемы является создание общегосударственной базы статистических данных КТ-диагностики.*

*Проведен анализ данных Всеукраинской аудита КТ по количеству КТ-систем на территории страны по состоянию на 2019 год. По полученным данным было проведено сравнение данных Государственной инспекции ядерного регулирования Украины (ГИЯР) и Минздрава Украины относительно использования КТ в стране. Выявлены существенные различия в количестве КТ-систем, что свидетельствует об отсутствии единых подходов к учету и мониторингу КТ в Украине.*

*Рассмотрена типовая процедура контроля уровней дозы при облучении во время основных рентгенологических исследований. Выявлены основные факторы формирования индекса дозы при интервенционной и спиральной КТ. Рассмотрены возможности снижения дозовой нагрузки на пациента благодаря изменению режимов мультиспирального КТ-сканирования. Для получения референтных значений индекса дозы при спиральной КТ было проведено сканирование дозиметрического рентген-антропоморфного фантома.*

*Полученные результаты можно применять при обработке данных аудита КТ, для чего предложена форма анкеты, которая содержит параметры протокола КТ-исследования и результаты измерений и расчетов с целью дальнейшей системной оценки коллективной дозы при КТ в Украине.*

**Ключевые слова:** компьютерная томография (КТ), доза облучения, индекс дозы КТ, эффективная доза, питч.



Dorosh A. M., Stadnyk L. L., Averyanova L. O.

**THE CURRENT STATE OF THE SYSTEM OF PATIENT'S COMPUTED TOMOGRAPHY DOSE CONTROL IN MEDICAL INSTITUTIONS OF UKRAINE**

*The issues of dose load control on patients caused by X-ray computed tomography (CT) are considered. It was found that in many countries of the world the prevalence of modern technologies of CT diagnostics is growing, however they are the ones that cause the greatest radiation exposure on the patient. In order to monitor the collective dose of CT scans within the state in developed countries a careful collection of statistics on CT studies is carried out. In Ukraine systematic monitoring of the collective dose of CT is still not carried out, which violates the requirements of the International Commission on Radiological Protection. A promising solution to this problem is to create a national database of statistics of CT diagnostics.*

*The analysis of data of the All-Ukrainian audit of CT on the number of CT systems in the country as of 2019 is carried out. Based on the obtained data the comparison was made between the data of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine (SINR) and the Ministry of Healthcare of Ukraine regarding the use of CT in the country. Significant differences in the number of CT systems have been identified, which indicates the absence of unified approaches to the accounting and monitoring of CT in Ukraine.*

*A typical procedure for monitoring dose levels of irradiation during basic x-ray studies is considered. The main factors of the formation of the dose index for interventional and spiral CT are revealed. The possibilities of reducing the dose load on the patient due to a change in the multi-spiral CT scan modes are considered. To obtain reference dose index values for spiral CT, a dosimetric x-ray anthropomorphic phantom was scanned.*

*The results can be used in the processing of CT audit data, for which a questionnaire form is proposed that contains the parameters of the CT study protocol and the results of measurements and calculations with the aim of further systematic assessment of the collective dose for CT in Ukraine.*

**Keywords:** *computed tomography (CT), radiation dose, CT dose index, effective dose, pitch.*

*Статья принята*

*Рецензент*

**УДК 615.47**

**Киряк А. А., Кокорев А. Э., Аврунин О. Г., Сорочан Е. Н.**

**ОБЗОР МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА В КОНТЕКСТЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ**

*Рассматриваются подходы компьютерного планирования лечения ожогов на основе математического моделирования биофизических свойств кожи с помощью механических моделей, учитывающих упругие и эластичные свойства кожи, и термомеханических моделей, которые учитывают терморегуляцию тканей. Приводится краткий обзор современных представлений о строении и функционировании кожи человека с особым вниманием к строению кровеносной системы. Отмечаются достоинства и недостатки данных моделей. Обсуждается вопрос о применении моделирования в области пластической хирургии, в частности, экспандерной дерматензии. Рассматривается математическое моделирование роста кожи. Отмечается, что механические модели кожи основаны на вычислении взаимосвязи напряжение-деформация и при известной зависимости, если только*