

ТОКСИКОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КАРБОНОВИХ НАНОТРУБОК

Вступ. У статті проаналізовано наявні літературні дані щодо основних властивостей вуглецевих нанотрубок як одного з найважливіших наноматеріалів. Вуглецеві нанотрубки мають унікальні механічні, електро- і теплопровідні властивості, їх широко використовують у наукових дослідженнях, промисловості та медицині. Нанотехнології на сьогодні є найбільш перспективним у розвитку світової науки напрямком. Наноматеріали стали причиною справжнього прориву в багатьох галузях і проникають у всі сфери нашого життя. Одним із пріоритетних видів наноматеріалів є вуглецеві нанотрубки. Це мультифункціональні матеріали, які активно досліджують у зв'язку з їх унікальними фізико-хімічними властивостями. Вони існують у різноманітних формах та можуть бути хімічно модифіковані функціональними групами біомолекул. Нанотрубки є перспективним наноматеріалом для використання в медицині завдяки надзвичайно високому рівню біосумісності їх із кров'ю, кістками, хрящами і м'якими тканинами. Їх можна використовувати для створення штучних серцевих клапанів, діагностики і терапії ракових захворювань, а також для транспортування протеїнів, антигенів, генів, вакцин та лікарських речовин у клітину. Акцентовано увагу на тому, що вуглецеві нанотрубки відкривають нові можливості для біологічного та медичного застосування: візуалізація молекулярних, клітинних і тканинних структур; створення біосенсорів і електродів на їх основі; цільова доставка різноманітних речовин; променева і фототермічна терапія. З повсякденним зростанням темпів використання наноматеріалів усе менше уваги приділяють можливим негативним впливам наночастинок на безпеку навколишнього середовища та на здоров'я людей у цілому. Малий розмір, специфічна структура, велика площа поверхні, хімічний склад насторожують щодо можливого токсичного впливу на організм людини. Залежно від шляху введення в організм та дози вуглецеві нанотрубки є потенційно небезпечними для нього. Зважаючи на це, виникає необхідність у вивченні їх токсикологічних властивостей.

Мета дослідження – проаналізувати сучасні літературні джерела щодо особливостей токсикологічного впливу вуглецевих нанотрубок.

Висновки. Наявна на сьогодні незначна кількість досліджень у цьому напрямку вказує на те, що наноматеріали можуть бути токсичними. Тому перспективи широкого застосування зумовлюють необхідність продовження досліджень особливостей їх впливу на здоров'я людини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: наночастинки; вуглецеві нанотрубки; токсичність.

Розвиток нанотехнологій в останні десятиріччя став однією з основних рушійних сил нової науково-технічної революції, яка привела до значних змін у багатьох галузях промисловості, охорони довкілля та медицини [1–3]. Швидкий прогрес новітніх технологій відкриває широкі перспективи в отриманні матеріалів із принципово новими корисними властивостями для використання в усіх сферах діяльності людини, проте, водночас, викликає велике занепокоєння у зв'язку з потенційним ризиком наноматеріалів, насамперед наночастинок, для здоров'я людини та навколишнього середовища.

© Н. Я. Летняк, 2021.

Наноматеріали стають причиною справжнього прориву в багатьох галузях науки і техніки та проникають у всі сфери нашого життя. Обсяги їх випуску збільшуються з року в рік [4].

Незважаючи на вражаючі перспективи застосування нанотехнологій, унікальні фізико-хімічні властивості наночастинок, матеріали на їх основі не можуть не викликати побоювань щодо їх біологічної сумісності й можливих негативних наслідків взаємодії з живими організмами [2].

У зв'язку з розвитком технологій одержання та використання наноматеріалів, які, завдяки особливим хімічним, біологічним, фармакологічним і механічним властивостям, здатні чинити

непрогнозований вплив на біологічні об'єкти, в сучасній науці постає проблема оцінки ризику для організму людини і навколишнього середовища при виробництві та застосуванні наноречовин. Виникають певні труднощі у виявленні ступеня токсичності тих чи інших нанопродуктів, а саме токсичність наночастинок не може бути оцінена порівняно з аналогами у малодисперсній формі, бо токсикологічні властивості наноматеріалів є результатом не лише їх хімічного складу, а й зміни поверхневих характеристик, хімічної реактивності, форми тощо [4].

Порівняно з речовинами, які перебувають у звичайному фізико-хімічному стані, наноматеріали можуть мати зовсім інші фізико-хімічні характеристики і біологічну (в тому числі токсичну) дію, будучи для живої природи нехарактерними дрібнодисперсними політантами з маловивченими токсикологічними властивостями.

Потенційна небезпека наноматеріалів зумовлена насамперед унікальними особливостями їх поведінки в нанорозмірному стані: зростання хімічного потенціалу речовин на міжфазній межі високої кривизни призводить до суттєвих змін розчинності, реакційної і каталітичної здатності наночастинок та їх компонентів; велика питома поверхня наночастинок підвищує їх адсорбційну ємність, хімічну реакційну спроможність і каталітичні властивості, спричиняє збільшення продукції вільних радикалів й активних форм оксигену, далі – ушкодження біологічних структур: ліпідів, протеїнів, нуклеїнових кислот і ДНК, саме таким, за сучасними даними, є механізм токсичної дії наночастинок; через малий розмір наночастинок можуть не розпізнаватися захисними системами організму, вони не піддаються біотрансформації і не виводяться з організму, різноманітність форм наночастинок дає можливість зв'язуватися їм з нуклеїновими кислотами, протеїнами, вбудовуватися в мембрани, проникати в клітинні органели і тим самим змінювати функції біоструктур; через свою високорозвинену поверхню наночастинок можуть сорбувати органічні та неорганічні сполуки, здатні поглинати на одиницю своєї маси в багато разів більше адсорбованих речовин (іонів важких металів, отрутохімікатів, радіонуклідів), ніж аналогічні макроскопічні дисперсії, тому можуть бути носіями великого числа токсинів, у результаті стає можливим посилення транспортування всередину клітини разом із наночастинками цих отрут, що різко посилює їх і без того високу токсичність [5].

Таким чином, властивості, завдяки яким наноматеріали настільки привабливі для широкого використання, роблять їх при певному збігу обставин також небезпечними для людини і

природи. Тому вивчення їх токсичності є важливим аспектом з точки зору оцінки ризику їх впливу на навколишнє середовище, а також здоров'я людини [6].

Прояв токсичних властивостей штучних наноматеріалів при взаємодії з біологічними об'єктами визначається не лише незвичайними фізико-хімічними властивостями, а й також структурними особливостями і розмірами наночастинок. Токсична дія наночастинок може посилюватися такими факторами, як нанесення покриттів на їх поверхню, хімічне модифікування поверхні, опромінення ультрафіолетовим світлом [7, 8].

Попередні токсикологічні дослідження показали, що для наночастинок характерною є підвищена здатність до зв'язування з біологічними макромолекулами (ДНК, РНК, протеїни) з можливою модифікацією їх властивостей. Вони здатні проникати крізь біологічні мембрани і фізіологічні бар'єри організму (гематоенцефалічний, кишковий). Через підвищену адсорбційну ємність наночастинок можуть слугувати "провідниками" в організм деяких розповсюджених токсикантів (ксенобіотиків, важких металів, пестицидів тощо), а також відіграють роль активаторів процесів вільнорадикального пероксидного окиснення, що призводить до ушкодження біологічних структур [9].

Токсичність наноматеріалів, згідно з наявними літературними даними, зумовлена перш за все інтенсифікацією оксидативного стресу й ушкодженням ДНК, що може призводити до розвитку запальної реакції, апоптозу і некрозу. Участь наночастинок у процесі утворення кисневих радикалів залежить від поверхневих властивостей наночастинок (фотохімічних, електричного поля, щільності заряду та електронної провідності). Наслідками підвищення рівня вільних радикалів є руйнування макромолекул (наприклад, фосфоліпідів, нуклеїнових кислот і протеїнів), порушення клітинних процесів (наприклад, отримання енергії в мітохондріях). Не можна виключати і наявності інших механізмів токсичності наноматеріалів, пов'язаних, зокрема, з їх шкідливою дією на клітинні мембрани й органели, посиленням транспортування потенційно токсичних компонентів через бар'єри організму, а також можливої генотоксичності та алергізуючої дії [7, 10].

В останні десятиріччя інтенсивно досліджують карбонові наноструктурні матеріали, найважливіше місце серед яких займають карбонові нанотрубки.

Токсичність нанотрубок перш за все залежить від характеристики самих нанотрубок, одержуваних різними способами, які відрізня-

ються кількістю шарів у стінці, розмірами, чистою, ступенем дефектності, електропровідністю, хімією поверхні тощо. З іншого боку, тип та структура біологічних клітин також визначають біосумісність і токсичність будь-якого наноматеріалу [6, 8, 11].

Необхідно відзначити, що дані щодо токсичності нанотрубок дуже неоднозначні або й суперечливі. На даний час питання про механізми токсичності нанотрубок залишається відкритим. Токсикологічні дослідження інтратрахеального введення одностінних карбонових нанотрубок, проведені на мишах J. Folkmann, дали неоднозначні результати: від відсутності токсичності до запалення з формуванням гранульом у легенях і смерті експериментальних тварин [1, 12]. Дослідження токсичності одностінних карбонових нанотрубок *in vivo* та *in vitro* продемонстрували клітинні реакції, що включають запальну відповідь, оксидативний стрес і розростання фіброзної тканини [10].

Нанотрубкам притаманна більш виражена токсичність порівняно зі звичайними мікрочастками. У механізмі ушкоджувальної дії наночастинок, виходячи з їх фізико-хімічних особливостей та будови, на перший план виступає здатність до продукування вільних радикалів і активних форм кисню та, як наслідок, до ушкодження біологічних структур – ліпідів, протеїнів, нуклеїнових кислот. Наночастинки характеризуються вищою, ніж звичайні мікрочастки, здатністю проникати в незміненому вигляді через клітинні бар'єри, а також гематоенцефалічний бар'єр у ЦНС, циркулювати і накопичуватися в органах та тканинах, призводити до патоморфологічних уражень внутрішніх органів [4, 13].

Спрямованість та виразність токсичних ефектів нанотрубок залежать від таких параметрів, як хімічна природа, ступінь диспергування в розчині, наявність технологічних домішок, морфологічна організація, структурні особливості, поверхневий заряд, електрокінетичний потенціал частинки в розчині, гідрофільність та гідрофобність. Розмір і форма також впливають на прояви токсичності, причому пріоритетну роль у процесі розвитку токсичних ефектів за малих доз карбонових нанотрубок відіграє саме форма частинки, тоді як рівень проникнення в клітину та цитотоксичність залежать від довжини карбонових нанотрубок (короткі проникають активніше) [14]. Так, дрібні наночастинок веретеноподібної форми викликають більш руйнівні ефекти в організмі, ніж подібні до них частинки сферичної форми. Опубліковано результати, які свідчать про те, що довгі й товсті карбонові нанотрубки зумовлюють більш значні ушкодження ДНК порівняно з короткими і тонкими. Також

доведено, що довгі багатошарові карбонові нанотрубки можуть негативно впливати на живі організми аналогічно азбестовим матеріалам [5, 7, 15].

Відомо, що токсична дія карбонових нанотрубок залежить від наявності домішок металів [8]. При дослідженні токсичності карбонових нанотрубок, що містять залізо (26,9 %), в дозі 5 мг/кг випадків летальності серед тварин не відзначали, спостерігали середнього ступеня вираження млявості, гіпотермію, тремор при дотику, які найбільш яскраво проявилися через 8–12 год після експозиції з подальшим зникненням симптоматики [16].

Результати досліджень вказують також на те, що присутність домішок металів у складі одностінних карбонових нанотрубок призводила до виникнення токсичних ефектів в епітеліальних клітинах легень людини (NR 8383, A549), тоді як очищені одно- і багатостінні нанотрубки (100 мкг/мл) не спричиняли токсичної дії на ці клітини [17, 18]. Крім того, мають значення їх тип та вид функціональних груп, приєднаних до їх поверхні.

За даними літературних джерел, відомо, що наночастинок можуть потрапляти в організм людини трьома основними шляхами: через дихальну систему, шлунково-кишковий тракт і шкіру. При потрапленні через дихальну систему їх розподіл значно залежить від розміру частинок (частинки розміром 5–100 нм мають найбільшу біодоступність, а отже, найвищий токсичний ризик). С. Lam та співавт. відмітили, що всі одностінні карбонові нанотрубки викликають дозозалежну гранульому і запалення в легенях [10, 18]. Так, після інгаляції в піддослідних тварин карбонові наночастинок у крові визначалися вже через 1 хв, спричиняючи агрегацію тромбоцитів, стимулюючи судинний тромбоз у каротидних артеріях щурів. Крім цього, згадується, що вплив одностінних карбонових нанотрубок здатний викликати збільшення атеросклеротичних бляшок у великих судинах [17].

Результати досліджень впливу карбонових нанотрубок на шкіру вказують на те, що неочищений препарат одностінних карбонових нанотрубок із 30 % масовим вмістом заліза викликав виражений оксидативний стрес у культурі кератиноцитів людини (зростав вміст продуктів пероксидного окиснення ліпідів, зменшувалися вміст вітаміну Е і загальний антиоксидантний потенціал). Одностінні карбонові нанотрубки (як неочищені, так і очищені та переведені в розчинну форму) знижували життєздатність епідермальних кератиноцитів, а у високих дозах збільшували вироблення запальних маркерів інтерлейкіну-6 та інтерлейкіну-8 [12]. При впливі багатостінних карбонових нанотрубок на фібро-

бласти шкіри змінювався рівень експресії 216 генів, що дозволило припустити можливі молекулярні механізми токсичності: порушення діяльності апарату Гольджі, зміни метаболізму протеїнів, секреторної функції, синтезу жирних кислот, клітинного гомеостазу [15].

Що стосується впливу карбонових наночастинок при потраплянні через шлунково-кишковий тракт, то деякі автори висловлюють гіпотезу про етіологію хвороби Крона і неспецифічного виразкового коліту, що може бути пов'язано, зокрема, з проникненням наночастинок у кишечник людини [18].

Токсичність карбонових нанотрубок залежить не лише від шляхів надходження в організм, а й від їх концентрації [8]. М. Mahmood у своєму дослідженні, використовуючи золоті, срібні наночастинок й однотинні карбонові нанотрубки, які доставляли до двох ліній клітин (MLO-Y4 та HeLa) в різних концентраціях, встановив, що після поглинання наноматеріалів відсоток клітинної загибелі був найвищим для карбонових нанотрубок і зростав поступово зі збільшенням концентрації цих структур [11].

Огляд літературних даних свідчить про значні розбіжності в результатах токсикологічних експериментів. Так, поряд зі встановленим шкідливим впливом карбонових наноструктур на епідермальні кератиноцити, фібробласти, гепатоцити, астроцити, епітеліоцити бронхів, макрофаги, лімфоцити піддослідних тварин, у багатьох експериментах (як *in vivo*, так й *in vitro*), водночас, зафіксовано відсутність токсикологічного впливу карбонових нанотрубок. Зокрема, модифіковані гепарином багатотинні карбонові нанотрубки при концентрації 3 мг/мл за умов *in vitro* виявилися сумісними з кров'ю людини, а тижневий контакт фібробластів щурів із функціоналізованими СООН-групами багатотинних карбонових нанотрубок не спричинив цитотоксичного ефекту. Проте в літературі існують дані, згідно з якими функціоналізація багатотинних карбонових нанотрубок не є обов'язковою для біосумісності – достатньо того, що карбонові нанотрубки очищені й не містять залишків металів [14, 18]. Водночас, окрім рівня чистоти матеріалу, вмісту домішок, форми та розміру, їх токсичність залежить від багатьох інших чинників. Зокрема, мають значення спосіб отримання та кількість прошарків у стінці карбонових нанотрубок: так, є дані про більший ступінь токсичності саме багатотинних карбонових нанотрубок. Від типу карбонових нанотрубок залежить і реакція на них макрофагів: останнім важко поглинути довгі (понад 20 нм) та жорсткі карбонові нанотрубки, і вони реагують лише викидом у відповідне середовище токсичних форм оксиге-

ну та гідролітичних ензимів, що викликають хронічне запалення [12].

Що стосується дослідження впливу наноматеріалів на імунну систему, то даних про взаємодію карбонових нанотрубок з нею дуже мало, але є повідомлення про їх вплив на макрофаги, лімфоцити і тимоцити експериментальних тварин, зокрема, помічено, що нанотрубки не спричиняють розвитку алергії. Існують повідомлення і про негативний вплив карбонових нанотрубок, що потрапили через легені, на клітини імунної системи шляхом пригнічення функціональної активності Т-лімфоцитів (без зміни їх кількісного складу), а також сприяння розвитку алергічних реакцій у щурів через активацію В-лімфоцитів та підвищення продуктивності імуноглобуліну Е [18].

Результати досліджень поведінки нанотрубок у клітинах організму людини показали, що вони проникають крізь мембрану, накопичуються в цитоплазмі та ядрі й, зрештою, призводять до загибелі клітини. Ключовим механізмом, який, на думку багатьох дослідників, є відповідальним за генотоксичні ефекти наноматеріалів, є індукція в клітинах оксидативного стресу, під яким розуміють порушення гомеостазу в клітині внаслідок підвищення вмісту активних форм оксигену та зниження вмісту антиоксидантів [11, 16]. Розвиток оксидативного стресу безпосередньо пов'язаний з активацією програмованої клітинної загибелі – апоптозом, який є найважливішим механізмом контролю клітинних популяцій у багатоклітинному організмі [12]. Одно- і багатотинні карбонові нанотрубки відрізняються ступенем цитотоксичності, а отже, і здатністю індукувати оксидативний стрес. На токсичність карбонових трубок впливає такий розмірний фактор, як діаметр трубки. Встановлено, що істотну цитотоксичність мають нанотрубки з діаметром 1–4 нм порівняно з трубками діаметром 10–20 нм [18]. Таким чином, чим менші за розміром наночастинок, тим більший оксидативний стрес вони можуть спричинити [8, 14].

Здатність нанотрубок здійснювати транспортування певних речовин усередину клітини робить актуальним питання про потенційну можливість посилення токсичної дії класичних токсикантів при їх сумісному надходженні в організм з нанотрубками.

Отже, спираючись на велику кількість даних, можна стверджувати, що нові типи структурних нанорозмірних матеріалів, завдяки своїм унікальним властивостям, відкривають нові горизонти для застосування їх у різних галузях промисловості, медицині та інших сферах людської діяльності. Проте слід зазначити, що на сьогодні існують значні розбіжності у відомостях

щодо токсичної дії наноматеріалів і, зокрема, карбонових нанотрубок на клітинному, органно-му та організменному рівнях. Така розбіжність пов'язана насамперед з тим, що механізми взаємодії карбонових нанотрубок з біомолекулами досі залишаються нез'ясованими [17]. Перспективи широкого застосування карбонових нанотрубок у промисловості й медицині, інтенсивне виробництво в усьому світі зумовлюють необхідність продовження досліджень особливостей їх впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Сьогодні стоїть важливе наукове і соціальне завдання – ґрунтовно вивчити можливий токсичний вплив наноструктур на живі клітини і довкілля, а також розробити ефективні методи зменшення їх негативної дії та заходи щодо безпеки використання [15].

Специфічні біологічні ефекти наноструктур, пов'язані з цим ризики для здоров'я людини і можливі шкідливі наслідки зумовлюють необхідність проведення досліджень, метою яких є гарантування безпечного застосування нанотехнологій та наноматеріалів [9].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абаева Л. Ф. Наночастицы и нанотехнологии в медицине сегодня и завтра / Л. Ф. Абаева, В. И. Шумский, Е. Н. Петрицкая // Альм. клинич. медицины. – 2010. – № 22. – С. 10–16.
2. Каркищенко Н. Н. Нанобезопасность: новые подходы к оценке рисков и токсичности наноматериалов / Н. Н. Каркищенко // Биомедицина. – 2009. – № 1. – С. 5–27.
3. Пуцилло Е. В. Системный подход к оценке влияния нанотехнологий на здоровье нации / Е. В. Пуцилло // Модернизация России: ключевые проблемы и решения : докл. на XII Междунар. науч. конф., 15–16 дек. 2011 г. – 2011. – 14 с.
4. Возможности биомедицинского применения углеродных нанотрубок / И. В. Митрофанова, В. И. Мильто, И. В. Суходоло, Г. Ю. Васюков // Бюлл. сибир. медицины. – 2014. – 13, № 1. – С. 135–144.
5. Михайленко В. М. Нанотехнології – перспективи застосування та ризики для здоров'я людини / В. М. Михайленко, П. М. Михайленко, Л. О. Єлейко // Онкологія. – 2008. – 10, № 4. – С. 420–429.
6. Леоненко Н. С. Особливості фізико-хімічних властивостей та токсичної дії наноматеріалів – до проблеми оцінки їхнього небезпечного впливу на живі організми (огляд літератури) / Н. С. Леоненко, О. В. Демецька, О. Б. Леоненко // Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки. – 2016. – № 1. – С. 64–77.
7. Прилуцька С. В. Токсичність вуглецевих наноструктур у системах *in vitro* та *in vivo* / С. В. Прилуцька, Д. М. Ротко, Ю. І. Прилуцький // Сучасні проблеми токсикології. – 2012. – № 3–4. – С. 49–57.
8. Ротко Д. М. Вуглецеві нанотрубки як новітні матеріали для нейроінженерії / Д. М. Ротко, С. В. Прилуцька, К. І. Богуцька // Біотехнологія. – 2011. – 4, № 5. – С. 9–24.
9. Чекман І. С. Наночастинки: властивості та перспективи застосування / І. С. Чекман // Укр. біохім. журн. – 2009. – 1, № 81. – С. 122–129.
10. Чекман І. С. Наногенотоксикологія: вплив наночастинок на клітину / І. С. Чекман, М. О. Говоруха, А. М. Дорошенко // Укр. мед. часоп. – 2011. – 1, № 81. – С. 30–35.
11. Oxidative stress and inflammatory response in dermal toxicity of single-walled carbon nanotubes / A. R. Murray, E. Kisin, S. S. Leonard [et al.] // Toxicology. – 2009. – 257. – P. 161–171.
12. Mechanisms of carbon nanotube-induced toxicity: focus on oxidative stress / A. A. Shvedova, A. Pietroiusti, B. Fadeel, V. E. Kagan // Toxicol. Appl. Pharmacol. – 2012. – 261. – P. 121–133.
13. Трахтенберг І. М. Наночастинки металів, методи отримання, сфери застосування, фізико-хімічні та токсичні властивості / І. М. Трахтенберг, Н. М. Дмитруха // Укр. журн. з проблем медицини праці. – 2013. – № 4 (37). – С. 62–74.
14. Микитюк М. В. Наночастинки та перспективи їх застосування в біології і медицині / М. В. Микитюк // Проблеми екології та медицини. – 2011. – № 5–6. – С. 41–49.
15. Наукові основи наномедицини, нанофармакології та нанофармації / В. Ф. Москаленко, В. М. Лісовий, І. С. Чекман [та ін.] // Наук. вісн. Нац. мед. ун-ту ім. О. О. Богомольця. – 2009. – № 2. – С. 17–31.
16. Прилуцька С. В. Вуглецеві нанотрубки як новий клас матеріалів для нанобіотехнології / С. В. Прилуцька, О. В. Ременяк, Ю. В. Гончаренко // Біотехнологія. – 2009. – 2, № 2. – С. 55–66.
17. Нанотехнологии и перспективы их использования в медицине и биотехнологии / В. М. Лахтин, С. С. Афанасьев, М. В. Лахтин [и др.] // Вестн. РАМН. – 2008. – № 4 – С. 50–55.
18. Проданчук Н. Г. Нанотоксикология: состояние и перспективы исследований / Н. Г. Проданчук, Г. М. Балан // Сучасні проблеми токсикології. – 2009. – № 3–4. – С. 4–20.

REFERENCES

1. Abayeva, L.F., Shumskiy, V.I., Petritskaya, E.N., Rogatkin, D.A., & Lyubchenko, P.N. (2010). Nanoparticles and nanotechnologies in medicine today and tomorrow. *Almanac of Clinical Medicine*, 22, 10-16 [in Russian].
2. Karkyshchenko, N.N. (2009). Nanosafety: new approaches to risk assessment and toxicity of nanomaterials. *Biomedicine*, 1 (1), 5-27 [in Russian].
3. Pucillo, E.V. (2011). A systematic approach to assessing the impact of nanotechnologies on the health of the nation. Modernization of Russia: Key problems and solutions: *Materials of the XII International scientific Conf.* December 15-16 [in Russian].
4. Mitrofanova, I.V., Milto, I.V., Suhodolo, I.V., & Vasyukov, G.Y. (2014). Opportunities of biomedical use of carbon nanotubes. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2014, 13 (1), 135-144 [in Russian].
5. Mykhailenko, V.M., Mykhailenko, P.M., & Yeleiko, L.O. (2008) Nanotechnologies – perspectives and risks of use for human health]. *Oncology*, 10 (4), 420-429 [in Ukrainian].
6. Leonenko, N.S., Demetska, O.V., & Leonenko, O.B. (2016). Features of physicochemical properties and toxic effects of nanomaterials – to the problem of assessing their dangerous effects on living organisms. *Modern Problems of Toxicology, Food and Chemical Safety*, 1, 64-77 [in Ukrainian].
7. Prylutska S.V., Rotko D.M., & Prylutskyi Iu.I. (2012). Toxicity of carbon nanostructures in in vitro and in vivo systems. *Modern Problems of Toxicology*, 3/4, 49-57 [in Ukrainian].
8. Rotko, D.M., Prylutska, S.V., & Bohutska, K.I. (2011). Toxicity of carbon nanostructures in in vitro and in vivo systems. *Biotechnology. Scientific Journal*, 4 (5), 9-24
9. Chekman, I.S. (2009). Nanoparticles: properties and usage perspectives. *Ukrainian Biochemistry Journal*, 1 (81), 122-129 [in Ukrainian].
10. Chekman, I.S., Hovorukha, M.O., & Doroshenko, A.M. (2011) Nanogenotoxicology: the influence of nanoparticles on the cell. *Ukrainian Medical Journal*, 1 (81), I/II, 30-35 [in Ukrainian].
11. Murray, A.R., Kisin, E., & Leonard, S.S. (2009) Oxidative stress and inflammatory response: dermal toxicity of single-walled carbon nanotubes. *Toxicology*, 257, 161-171.
12. Shvedova, A.A., Pietroiusti, A., Fadeel, B., & Kagan, V.E. (2012). Mechanisms of carbon nanotube-induced toxicity: focus on oxidative stress. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, 261, 121-133.
13. Trakhtenberh, I.M., & Dmytrukha, N.M. (2013). Metal nanoparticles, production methods, areas of application, physicochemical and toxic properties. *Ukrainian Journal on Problem of Work Medicine*, 4 (37), 62-74 [in Ukrainian].
14. Mykytyuk, M.V. (2011). Nanoparticles and prospects for their application in biology and medicine. *Problems of Ecology and Medicine*, 5-6, 41-49 [in Ukrainian].
15. Moskalenko, V.F., Lisovyy, V.M., & Chekman, I.S. (2009). Scientific fundamentals of nanomedicine, nanopharmacology and nanopharmaceuticals. *O. Bohomolets Scientific Bulletin of the National Medical University*, 2, 17-31 [in Ukrainian].
16. Prylutska, S.V., Remeniak, O.V., & Honcharenko, Iu.V. (2009) Carbon nanotubes as a new class of materials for nanobiotechnology. *Biotechnology*, 2 (2), 55-66 [in Ukrainian].
17. Lakhtyn, V.M., & Afanasev, S.S., & Lakhtyn, M.V. (2008). Nanotechnologies and prospects for their use in medicine and biotechnology. *Bulletin of RAMN*, 4, 50-55 [in Ukrainian].
18. Prodanchuk, N.H., & Balan, H.M. (2009). Nanotoxicology: the state and prospects of research. *Modern Problems of Toxicology*, (4), 4-20 [in Ukrainian].

N. Ja. Letniak

I. HORBACHEVSKY TERNOPIL NATIONAL MEDICAL UNIVERSITY

TOXICOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON NANOTUBES

Summary

Introduction. The study analyzes the published literature data on key properties of one of the most important nanomaterials, carbon nanotubes. Carbon nanoparticles have unique mechanical, electrical and thermal properties and are widely used in scientific research, industry and medicine. Nanotechnology today is the most promising direction in the development of world science. Nanomaterials have caused a step forward in many industries and are used in our overall life. Carbon nanotubes are one of the priority types of nanomaterials. They are multifunctional materials that are actively studied due to their unique physical and chemical properties. They exist in various forms and can be chemically modified by functional groups of biomolecules. CNT have unique mechanical, electrical and thermal properties and are widely used in various industries. Nanotubes are a promising nanomaterial for medical use due to their really high biocompatibility with blood, bones, cartilages and soft tissues. They can be used to create artificial heart valves, for the diagnosis and treatment of cancer, as well as for the transport of proteins, antigens, genes, vaccines and medicinal substances into a cell. This material has a wide range of applications for biological

and medical use. Among them there are visualization of molecular, cellular and tissue structures; construction of biosensors and electrodes; targeted delivery of various substances; and the use in radiation and photothermal therapies. Due to everyday increase of nanomaterial use, less attention is paid to the possible negative effects of nanoparticles on environment and on people's health as a whole. Small size, specific structure, large surface area, and chemical composition alert of possible toxic effects on the human body. It was demonstrated that depending on the route of administration and the dose, body carbon nanotubes can be harmful to human body. Thus it is necessary to study the toxicological properties of carbon nanotubes their intake to the body.

The aim of the study – to analyze modern literature sources on the peculiarities of the toxicological effects of carbon nanotubes

Conclusions. The current small amount of research in this area suggests that nanomaterials can be toxic. Therefore, the prospects for widespread use necessitate the continuation of research on the specifics of their impact on human health.

KEY WORDS: **nanoparticles; carbon nanotubes; toxicity.**

Отримано 23.11.21

Адреса для листування: Н. Я. Летняк, Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, майдан Волі, 1, Тернопіль, 46001, Україна, e-mail: letnyak@tdmu.edu.ua.