



О.С. Шевченко¹, Л.Д. Тодоріко², В.І. Петренко³, Р.С. Шевченко¹,
І.А. Овчаренко¹, О.О. Погорєлова⁴

¹ Харківський національний медичний університет

² Буковинський державний медичний університет, Чернівці

³ Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ

⁴ Комунальне некомерційне підприємство Харківської обласної ради
«Обласна клінічна психіатрична лікарня № 3»

Вибухове ураження легень (огляд літератури)

Сучасні моделі терористичної діяльності та воєнних дій у всьому світі збільшили потенційні втрати, пов'язані з вибухами, але лише деякі цивільні лікарі мають досвід лікування пацієнтів із травмами, спричиненими вибухом, що зумовлює актуальність поширення знань про фізику й патогенез вибухової травми та супутніх типів травм, які можуть виникнути.

Мета роботи — описати основні механізми розвитку вибухових уражень легень й алгоритми діагностики та клінічного ведення таких пацієнтів.

Матеріали та методи. Проаналізовано 528 літературних джерел із бази даних PubMed за запитом «Blast lung injury», із них 35 відібрано для детальнішого аналізу.

Результати та обговорення. Вибухове ураження легень є основною причиною захворюваності та смертності жертв вибуху як на місці події, так і пізніше. Вплив вибухової хвилі на легені призводить до розриву, крововиливу, контузії та набряку, що спричиняє невідповідність вентиляції та перфузії. Вибухове ураження легень — це клінічний діагноз, який характеризується утрудненням дихання та гіпоксією, що можуть виникнути без явного зовнішнього пошкодження грудної клітки.

Висновки. Вибухове ураження легень є однією з найпоширеніших причин смертності постраждалих від вибуху. Лікування вибухових травм слід здійснювати мультидисциплінарною командою, до складу якої входять хірург-травматолог, загальний хірург, ЛОР-спеціаліст, офтальмолог, пластичний хірург, анестезіолог, реаніматолог, лікар відділення невідкладної допомоги та інші спеціалісти за потреби. Також цим пацієнтам рекомендована консультація щодо психічного здоров'я, оскільки в них можуть виникнути гострий стресовий розлад, порушення адаптації та посттравматичний стресовий розлад. Якщо травма незначна, то пацієнта можна спостерігати 6–8 год і виписати. Усіх осіб із серйозними вибуховими травмами слід госпіталізувати та контролювати. Для них передбачена подовжена фаза реабілітації.

Ключові слова

Вибухове ураження легень, травма, пов'язана з бойовими діями, торакальна травма.

Вибухове ураження легень є основною причиною захворюваності та смертності жертв вибуху як на місці події, так і пізніше. Вплив вибухової хвилі на легені призводить до розриву, крововиливу, контузії та набряку, що спричиняє невідповідність вентиляції та перфузії. Вибухове ураження легень — це клінічний діагноз, який характеризується утрудненням дихання та гіпоксією, що можуть виникнути без явного зовнішнього пошкодження грудної клітки.

Сучасні моделі терористичної діяльності та воєнних дій у всьому світі збільшили потенційні втрати, пов'язані з вибухами, але лише деякі

цивільні лікарі мають досвід лікування пацієнтів із травмами, спричиненими вибухом, що зумовлює актуальність поширення знань про фізику й патогенез вибухової травми та супутніх типів травм, які можуть виникнути.

Мета роботи — описати основні механізми розвитку вибухових уражень легень й алгоритми діагностики та клінічного ведення таких пацієнтів.

Матеріали та методи

Проаналізовано 528 літературних джерел із бази даних PubMed за запитом «Blast lung injury», із них 35 відібрано для детальнішого аналізу.

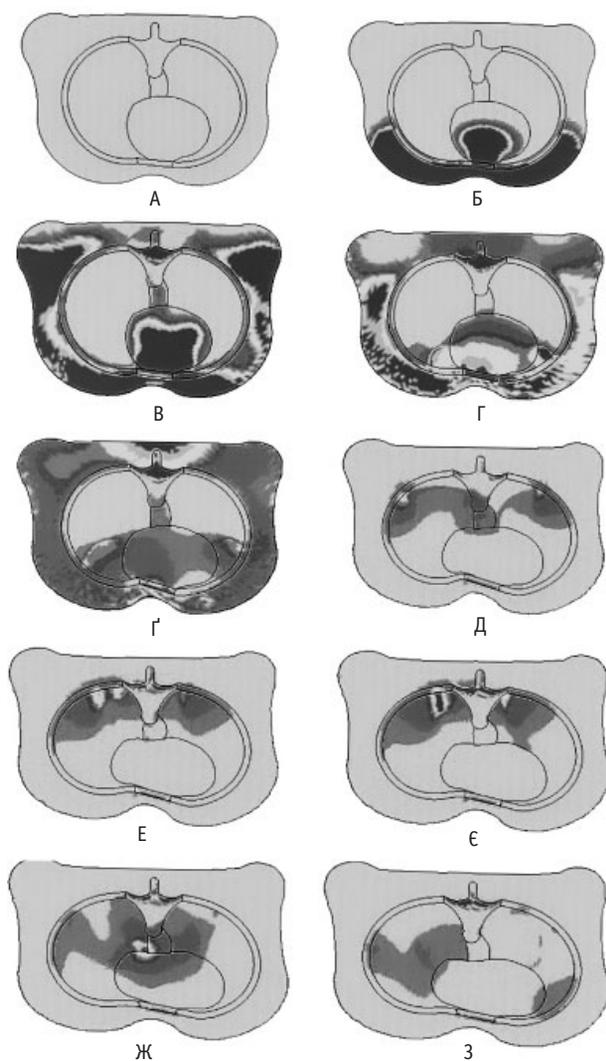


Рис. 1. Вплив вибухової хвилі на грудну клітку [22]

A — грудна клітка до впливу вибухової хвилі; Б — первинний вплив вибухової хвилі; В — поширення хвилі через грудну клітку; Г — формування хвиль напруги на передній поверхні легень; Д — проходження хвиль через легені; Е — поширення хвиль спереду дозаду; Ж — вплив на хребці; З — вплив відбитої хвилі на легені; И — злиття хвиль біля серця; К — подальше поширення хвиль меншої потужності.

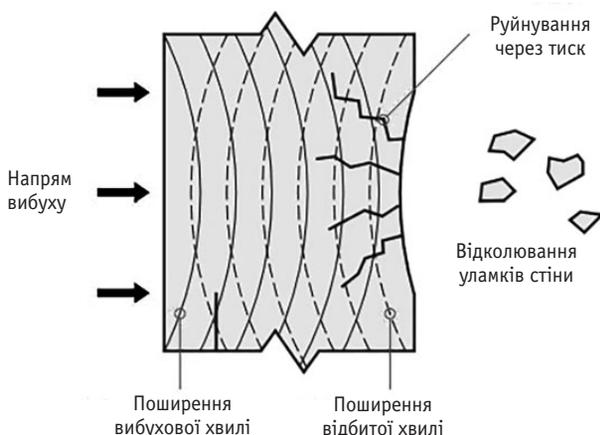


Рис. 2. Поширення ударних хвиль через середовище бетонної стіни та їхнє відображення у вигляді хвиль напруги [14]

Результати та обговорення

Вибух створює вибухову хвилю, яка характеризується майже миттєвим підвищенням тиску від атмосферного до максимального надлишкового. Коли фронт удару розширюється, тиск зменшується до тиску довкілля, виникає фаза негативного тиску, яка зазвичай довшіа [15].

Таким чином, вибухова хвиля має три компоненти:

1. Одноразове стрімке підвищення тиску. Передній фронт вибухової хвилі — фронт вибуху є найважливішим чинником патології первинного вибухового ураження.
2. Експоненціальне спадання з часом.
3. Набагато довшіа хвиля негативного тиску, який нижчий за початковий тиск довкілля.

Важливу роль відіграє те, де саме перебувала людина під час вибуху — на відкритому просторі чи в приміщенні [14, 31].

Обсяг та серйозність пошкоджень і травм під час вибуху неможливо точно передбачити, але можна припустити загальний рівень ушкоджень, які очікуються при вибуху, залежно від розміру вибуху, відстані від події та припущень щодо конструкції будівлі.

Вибухова хвиля впливає на тіло людини, передаючи хвилі високого тиску, які проходять крізь м'які тканини та м'язи дуже швидко. Розглянемо вплив вибухової хвилі на грудну клітку. Сила вибухової хвилі, взаємодіючи з грудною кліткою, спричиняє невелике її стиснення. Хвилі напруги генеруються в легенях і рухаються дещо паралельно вибуховій хвилі вздовж ребер, де вони є найвищими. Зрештою вони відбиваються в ділянках із гострими радіусами або від хребців. Внутрішнє відбиття хвиль збільшує їхню величину та створює місце найбільшої травми. Незважаючи на те, що величина тиску всередині легень повертається до тиску довкілля, легені залишаються пошкодженими, оскільки високий тиск, що розвинувся, був достатнім, щоб спричинити надмірне пошкодження (рис. 1) [22].

Важливе значення має також положення людини щодо стін під час вибуху, оскільки дія вибухової хвилі на стіну призводить до її руйнування, утворення уламків і вторинного ураження людини, якщо вона перебуває біля стіни (рис. 2). Що ближче людина перебуває до стіни під час вибуху, то тяжчими можуть бути травми. На відкритому просторі ураження легень більш виражене на боці, який повернутий у бік вибуху [16].

Вибухове ураження можна представити у вигляді чотирьох стадій. Первинне вибухове ураження спричинене безпосередньо дією ударної хвилі (табл. 1). Вторинне вибухове ураження виникає внаслідок дії снарядів, які активуються

Таблиця 1. Класифікація уражень унаслідок вибухової травми

Категорія	Характеристика	Частина тіла, що уражується	Тип ураження
Первинне	Виникає при високоенергетичних вибухах унаслідок дії вибухової хвилі та надлишкового тиску на тіло Поверхня тіла та внутрішні органи швидко деформуються, оскільки органи, що містять повітря, стискаються	Найбільше страждають органи, що містять повітря, — верхні дихальні шляхи, шлунково-кишковий тракт, середнє вухо Внутрішні деформації органів, що містять повітря, спричинюють деформацію сусідніх органів — серця, печінки, селезінки, нирок	Легенева баротравма Розрив барабанної перетинки і ураження середнього вуха Розриви шлунково-кишкового тракту (черевна кровотеча та перфорація) Струс мозку Розрив печінки, селезінки та нирок Забій серця Зміщення та розрив великих судин Повітряна емболія Пошкодження тканин мозку внаслідок порушення кровотоку
Вторинне	Ураження снарядами	Будь-яка Ураження залежить від швидкості, маси і форми снаряда	Проникні поранення
Третинне	Ураження, що виникає внаслідок швидкого переміщення тіла вибуховою хвилею	Будь-яка Насамперед страждають голова та шия	Типові травми, які зазвичай виникають під час падіння або автомобільної аварії Травматична ампутація Розриви м'язів
Четвертинне	Ураження, не пов'язані безпосередньо з вибуховою дією, а саме: – дія високої температури – токсичні гази	Будь-яка Частіше страждають шкіряні покриви, очі, дихальна система	Опіки Асфіксія Ураження внаслідок вдихання токсичних газів
Побічне	Вторинна відповідь на травму Загострення та ускладнення інших станів	Системна відповідь на масивну травму	Стенокардія Гіперглікемія Гіпертензія Загострення астми, хронічне обструктивне захворювання легень, інші порушення дихання

та починають рухатися. Після детонації шрапнель зі снаряда розсіюється з високою швидкістю та великою кінетичною енергією, що спричиняє проникні поранення або тупі контузійні травми. Третинна травма зумовлена тим, що людину підкидає в повітря сила вибуху. Травма виникає внаслідок контакту з твердими поверхнями (забої, переломи кінцівок і хребта або додаткові проникні поранення). Четвертинні травми охоплюють різноманітну групу наслідків (опіки від запаленого одягу, спалахові опіки від впливу гарячого повітря під час вибуху та вдихання гарячого повітря або токсичних залишків вибухової реакції). Супутні ефекти, такі як інфекція або радіаційна токсичність, також віднесено до цієї категорії. Можуть виникати побічні ураження, зокрема загострення та ускладнення інших станів на тлі травми [6, 12, 32].

Людина, яка потрапила під вплив вибуху, отримує первинні, вторинні, третинні, а також четвертинні ушкодження залежно від типу вибухової речовини [33].

Механізм легеневого вибухового ураження вивчено недостатньо, але існують загальноприйняті уявлення про патогенез ураження. Раніше вважалося, що вибухове ураження спричиняє травму через утворення патологічного доступу до внутрішніх органів крізь отвори тіла, але це припущення було спростовано. Внутрішнє пошкодження легень важко побачити ззовні, а воно може бути смертельним. Ударна хвиля спричинює фізичний вплив на тіло, що призводить до внутрішніх механічних пошкоджень.

Найімовірніший механізм пов'язаний з тим, що легені є порожнистими органами. Оскільки легені виповнені повітрям, коли на них діє зовнішній тиск, такий як ударна хвиля, вони зазнають швидкого стиснення та декомпресії через вплив хвилі тиску на грудну стінку. Ця швидка зміна спричинює розрив тонких тканин і клітинних стінок під дією стискальних та декомпресійних сил. Об'ємні зміни в легенях спотворюють і пошкоджують альвеоли. Крім того, різниця в міцності тканини на розрив та

швидкості проходження вибухової хвилі крізь різні тканини спричиняє травми різного ступеня. Пошкодження, яке виникає, коли вибухова хвиля стискає тканину, зсуває судинне русло та призводить до легеневої кровотечі, коли тканина стискається та розширюється. Також припускають, що вибухове ушкодження є наслідком взаємодії хвилі тиску на межі тканина—повітря. Хвиля позитивного тиску також передаватиметься на грудну стінку шляхом підвищення внутрішньочеревного тиску, що спричиняє швидке підняття діафрагми. Ефект імплузії призводить до накопичення бульбашок газу. Вода не повністю стискається під час передачі вибухової хвилі на відміну від газів. Після того, як пройшла вибухова хвиля, бульбашки накопичуються та спричиняють подальші хвилі тиску, а альвеоли, що містять повітря, ушкоджуються, коли бульбашки утворюються через повторне розширення, що пошкоджує легені. Повітряна емболія створюється внаслідок проштовхування газу крізь альвеоларно-капілярний бар'єр легень, що створює велику різницю тиску в судинній системі організму [9, 12, 18, 32, 33, 37].

Іншим запропонованим механізмом є інерційний ефект, зумовлений різною щільністю тканини. Швидкість поширення вибухової хвилі залежить від щільності середовища або тканини. Коли вибухова хвиля потрапляє в тканину, яка є пухкшою, її швидкість збільшується, що призводить до відокремлення різних тканин. Сили прискорення та уповільнення від вибухової хвилі спричиняють розрив легень. Ефект диференційного тиску зумовлений різницею тиску між тканиною та виповненою повітрям частиною легень. Травма спричинена нерівномірним розподілом тиску вибухової хвилі, що призводить до того, що клітини стискаються та лопаються. Крім того, при примусовому натисканні із судин витісняється рідина в менш стисливі сусідні структури, що призводить до внутрішніх пошкоджень. Стисливість тканини подібна до води, відносно нестисливої, тому місце пошкодження розташоване там, де різниця в стисливості є найбільшою, наприклад, на межі повітря—тканина. Органи, що містять повітря, розчавлюються під дією великого зовнішнього навантаження, оскільки вони порожнисті та стискаються. Вони спотворюються і створюють локальні високі напруги [9, 10, 33, 37].

Запропоновано механізм, за якого негативний тиск також спричиняє травму, подібну до такої при позитивному тиску. В обох випадках, як при дії позитивного, так і негативного тиску, виникає надмірне напруження через стискання та розширення тканини. Також припускають наявність

гемодинамічних чинників травми, пов'язаних з миттєвим підвищенням артеріального тиску. У нормі артеріальний тиск становить від 0,4 до 0,8 кПа, при миттєвому підвищенні він може зрости в 100 разів, що пошкодить дрібні кровоносні судини. Один із механізмів полягає в тому, що внутрішнє механічне пошкодження спричиняє біохімічні зміни, зокрема окисний стрес, опосередкований вільними радикалами, що призводить до пошкодження. Травми від вибухів у повітрі пов'язані з альвеоларним крововиливом, інтерстиціальним набряком і розривом альвеол, що порушує здатність до газообміну на межі альвеол. Унаслідок легеневої кровотечі та альвеоларного набряку відбувається затоплення альвеол, що знижує здатність до газообміну. Оскільки зменшується обмін кисню та вуглекислого газу, парціальний тиск кисню (P_{aO_2}) також зменшується, а парціальний тиск вуглекислого газу (P_{aCO_2}) не змінюється. Зменшення кисню спричиняє гіпоксемію, ступінь якої залежить від тяжкості вибухової речовини. Зі збільшенням тяжкості пошкодження легень P_{aO_2} знижується. Установлено, що при зниженні P_{aO_2} підсилюється перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ) і асоціація гемоглобіну. Крім того, ПОЛ пов'язане з антиоксидантним виснаженням і порушенням АТФ-залежного транспорту кальцію крізь клітинну мембрану. Цей ефект ПОЛ триває протягом годин після впливу вибухової хвилі. Окиснення ліпідів триває годинами, можливо, завдяки взаємодії гемоглобіну, продуктів його окиснення, таких як metHb або оксоферилHb, або продуктів його розпаду, гема або вільного заліза, які взаємодіють з окиснювачами або антиоксидантами. Коли продукти, отримані з гемоглобіну, взаємодіють із окиснювачами або антиоксидантами, відбуваються вільнорадикальні реакції, які, як вважають, спричиняють поширення ушкодження протягом тривалого періоду часу. Оксид азоту взаємодіє з опосередкованими гемоглобіном вільними радикальними реакціями та вступає в реакцію з ними [12, 37].

Фізіологічні ефекти, спричинені первинним вибуховим ураженням легень, наведені в табл. 2.

На рис. 3 представлений морфологічний препарат наслідків вибухового ураження легень [8].

Усі можливі патології, що виникають у результаті розриву альвеол (рис. 4), пов'язані з наявністю газу в міжальвеоларному просторі (у нормі він відсутній), грудній клітці, перикарді, заочеревинному просторі чи черевній порожнині [32].

Вибухове ураження зазвичай призводить до тріади подій у легенях [12]: пошкодження структур, які включають альвеоларний або капілярний бар'єр, спричиняє крововилив і набряк, утворен-

Таблиця 2. Механізми первинного вибухового ураження легень та пов'язані з цим фізіологічні ефекти

Механізм	Ефект
Зміна об'єму	Надмірні навантаження на тканини
Імплозія (доцентровий вибух)	Повітряна емболія
Ефект розколювання	Перехід рідини зі щільніших тканин у менш щільні
Інерційний ефект	Ураження внаслідок різниці в щільності тканин
Перепад тиску	Ураження, спричинене різницею тиску між паренхімою легені та повітрям, що міститься в альвеолах
Негативний тиск	Ураження, спричинене негативною фазою вибухової хвилі
Гемодинамічний ефект	Миттєве підвищення артеріального тиску переповнює кровоносні судини
Окисний стрес	Зниження парціального тиску кисню призводить до вивільнення вільних радикалів, які спричиняють ураження клітин

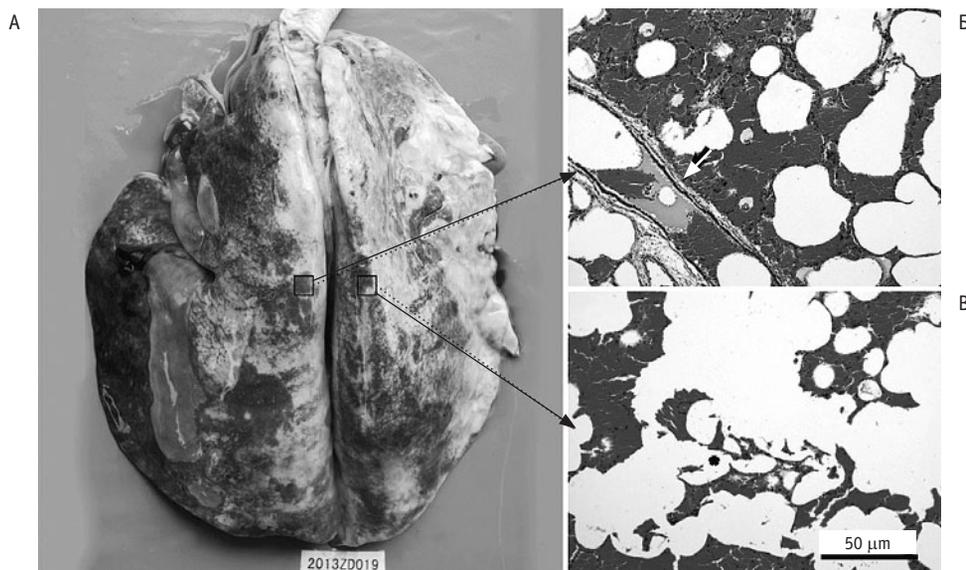


Рис. 3. Вибухове ураження легень надлишковим тиском 702,8 кПа

А — ділянки крововиливів в обох легенях, формування трьох бул у лівій легені; Б — бронхи й альвеоли заповнені кров'ю; В — зруйновані альвеолярні перетинки, сформовані злиті альвеолярні порожнини [8].

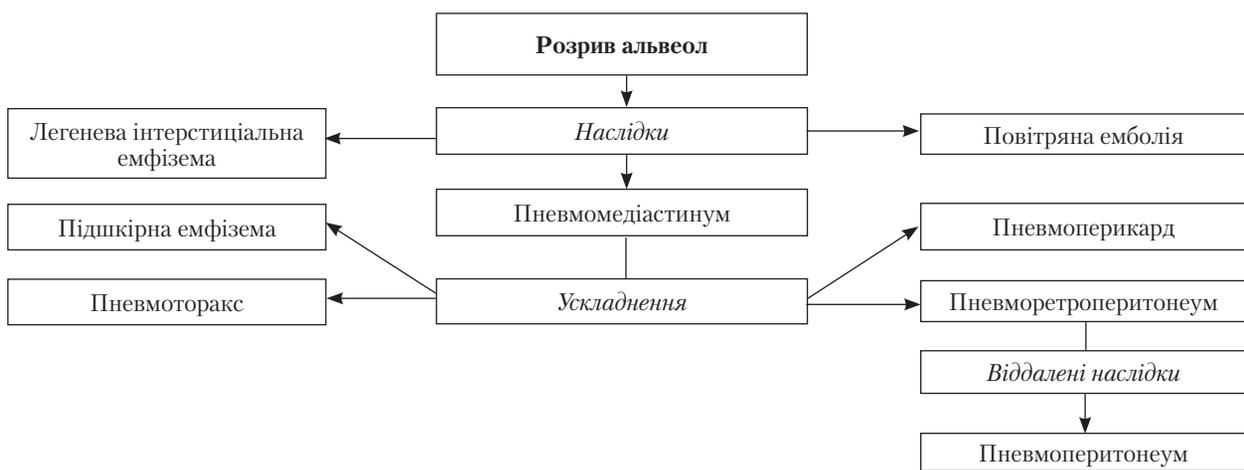


Рис. 4. Можливі наслідки при розриві альвеол [6]

ня повітряної емболії, що призводить до порушення кровообігу та ішемії, і запалення. Окисний стрес виникає внаслідок дисбалансу між окси-

дантами й антиоксидантами та зазвичай розвивається як наслідок утворення реактивних форм, що перевищує потужність антиоксидантних

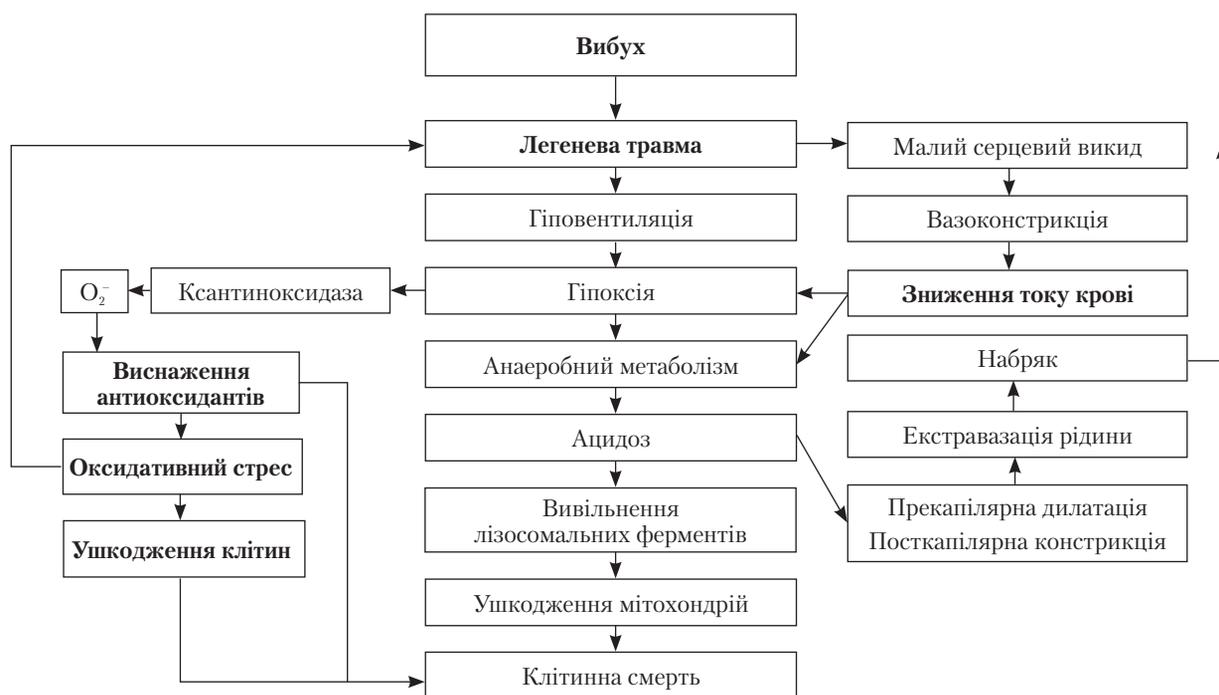


Рис. 5. Вторинний патогенез вибухового ураження легень [36]

систем (рис. 5). Він може розвиватися як наслідок кожного з компонентів тріади. Легенева кровотеча та накопичення в результаті цього вільного гемоглобіну спричиняють реакції вільних радикалів, що призводить до окисного пошкодження та підтримки прозапального стану [26]. Окисний стрес може спричинити окисне пошкодження клітинних компонентів (ліпідів, білків та ДНК). Низка чинників можуть призвести до окисного стресу й пошкодження легень, зокрема гемоглобін, який може генерувати активні форми кисню [27], і клітини запалення (лейкоцити та макрофаги), які є основним джерелом активних форм кисню [7]. До прооксидантів належать як вільні радикали (супероксид-аніон-радикал, гідроксильний радикал, діоксид азоту, оксиди азоту, етил-радикали), так і нерадикальні реагентні сполуки (перекис водню, гідропероксид ліпідів, гіпохлоринова кислота та залізо-кисневі комплекси). Вільні радикали мають здатність взаємодіяти один з одним з утворенням потужніших сполук, наприклад, пероксинітритного радикалу в результаті реакції супероксид-аніон-радикалу з оксидом азоту. Залучення радикалів і нерадикальних реактивних форм ускладнюється тим, що деякі з них є токсичними, наприклад, комплекси оксиду заліза, інші можуть бути корисними, захищаючи від інфекцій або в певних ситуаціях можуть діяти як антиоксиданти.

Велику роль у вибуховому ураженні легень відіграє і четвертинне ураження. Після вибуху утворюється велика кількість газів, як нетоксич-

них, так і токсичних. До основних нетоксичних газів належать пара (H_2O), вуглекислий газ (CO_2) і азот (N_2). Основними токсичними газами, що утворюються під час вибуху, є чадний газ (CO), NO та діоксид азоту (NO_2). Основні характеристики токсичних газів наведено в табл. 3.

Клінічно виділяють 7 ступенів тяжкості вибухової травми легень. Також для оцінки можна використовувати скорочену шкалу уражень (Abbreviated Injury Scale (AIS)) [23, 34] (табл. 4).

Отже, вибухове ураження легень — це найпоширеніша смертельна травма в тих, хто спочатку вижив після вибухів. Вибухова хвиля спричиняє виникнення сили прискорення, яка діє на грудну клітку і поширюється по легеневій паренхімі. Відбуваються складні взаємодії з передачею кінетичної енергії, які призводять до руйнування тканини на межі капілярно-альвеолярного поділу. Це може спричинити незначний або масивний паренхіматозний крововилив (рис. 6) [13], набряк легень, пневмоторакс або повітряну емболію через альвеоло-венозні фістули. Відбиття вибухової хвилі від структур середостіння призводить до появи характерних інфільтратів типу «крила летючої миші» або «метелика» на рентгенограмі грудної клітки або комп'ютерній томограмі в пацієнтів із вибуховою травмою легень [2] (рис. 7 і 8) [11, 13]. Як і інші первинні вибухові травми, вибухова травма легень трапляється в постраждалих, які перебували в безпосередній близькості від сильних вибухів у закритих приміщеннях [24]. Пацієнти з опіками

Таблиця 3. Характеристика основних токсичних газів, що виділяються після вибуху, та симптоми отруєння ними

Газ	Характеристики	Симптоми отруєння
Чадний газ	Безбарвний Без запаху	Головний біль Запаморочення Слабкість Почервоніння шкіри Тахікардія Зниження артеріального тиску Порушення концентрації уваги Нудота, блювання Порушення координації Втрата свідомості Кома Судоми Смерть
Оксид азоту	Безбарвний	Почервоніння очей Біль у животі Кашель Головний біль Запаморочення Ціаноз Задишка Судоми
Діоксид азоту	Коричневий З різким запахом	Опіки шкіри, очей, дихальних шляхів Кашель Запаморочення Головний біль Пітливість Утруднене дихання Нудота, блювання

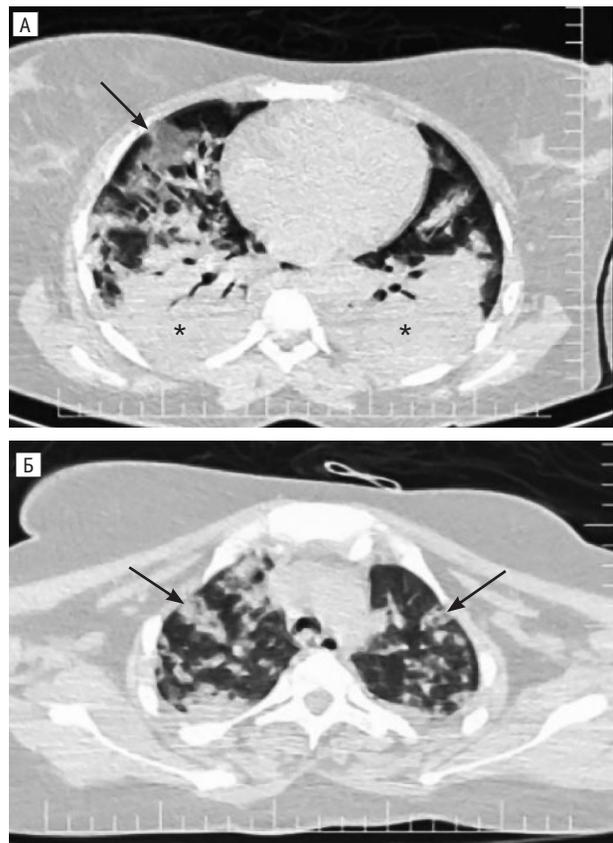


Рис. 6. Комп'ютерна томографія органів грудної клітки жінки віком 26 років із первинним вибуховим ураженням легень

На аксіальному зрізі (А) затемнення зі щільністю матового скла (стрілки) і симетричні зони консолидації (зірочки), що відповідає двобічному альвеолярному крововиливу в паренхіму легень. Ознак вторинних або третинних ушкоджень грудної стінки немає (Б) [13].

також мають вищу частоту легеневої вибухової травми, ніж пацієнти з травмами внаслідок вибуху без опіків [1]. Частота виникнення легеневої вибухової травми, за даними літератури, становить від 3 до 14 % [24, 25].

Таблиця 4. Шкала тяжкості легеневих уражень

Бал	Тяжкість	Симптоми	Шкала AIS
0	Немає		
1	Легка	Безсимптомний перебіг Деякі рентгенологічні зміни	Контузія (однобічна < 1 частки)
2	Помірна	Кашель, поверхнєве дихання	Контузія (однобічна, ціла частка) або розрив легені (пневмоторакс)
3	Тяжка	Незначне кровохаркання	Контузія (однобічна > 1 частки) або розрив легені (персистує > 72 год) або гематома
4	Тяжка	Тяжкі симптоми. Можливе одужання або смерть пацієнта	Великий розрив легені або гематома
5	Критична	Ціаноз, легенева кровотеча, зазвичай пацієнт помирає	Розриви судин коренів легень або багаточастковий розрив легень із напруженим пневмотораксом
6	Максимальна	Пацієнт помирає впродовж 30 хв	Максимальне ураження

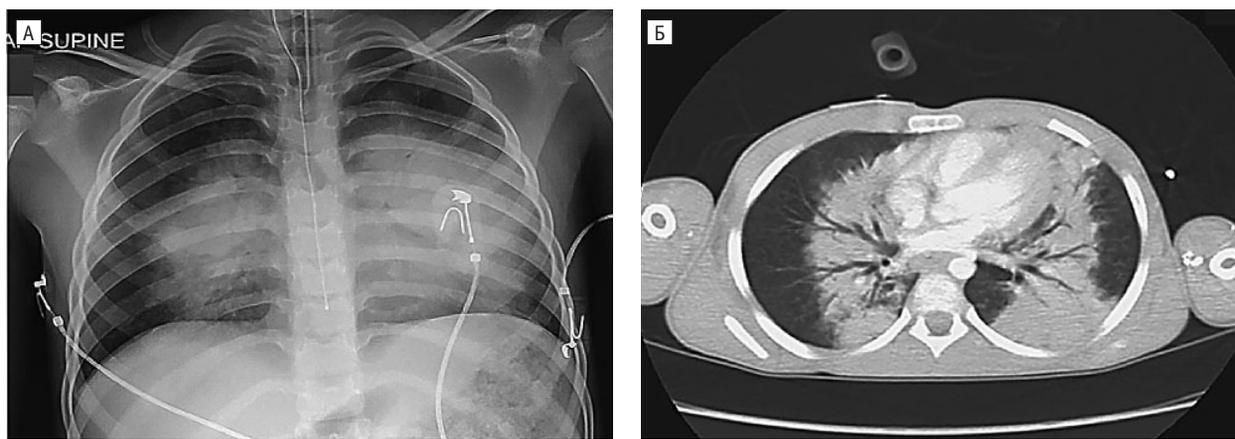


Рис. 7. Хлопчик віком 8 років отримав поранення внаслідок детонації саморобного вибухового пристрою неподалік від нього

У нього численні поранення обличчя, грудей, живота, ніг і правої руки осколками. Дорогою до лікарні його інтубували через обструкцію дихальних шляхів та серцево-судинну нестабільність. Рентгенографія органів грудної клітки (А) і комп'ютерна томографія (Б) виявили типові вияви вибухової травми легень з інтерстиціальними й альвеолярними дефектами наповнення та помітними повітряними бронхограмами у вигляді «метелика» [11].

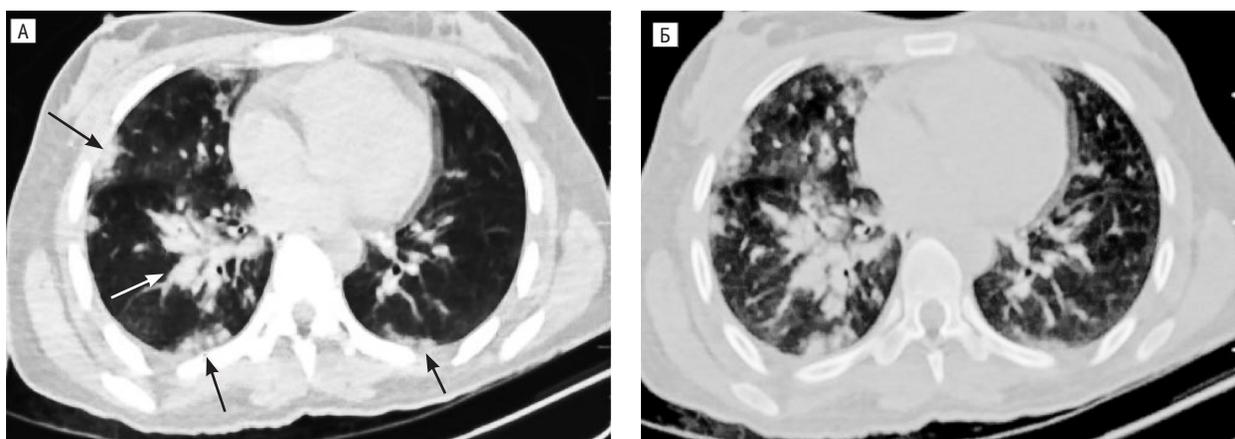


Рис. 8. Комп'ютерна томографія органів грудної клітки жінки віком 25 років із первинними вибуховими ушкодженнями

Аксіальне зображення (А) демонструє вогнищеві контузії (наконечники стрілок) у паренхімі легень і консолідацію (стрілка) правої перигілярної центральної ділянки. Немає доказів вторинних або третинних ушкоджень грудної стінки (Б) [13].

Клінічна діагностика вибухового ураження легень ґрунтується на наявності респіраторного дистресу, гіпоксії та інфільтратів типу «метелика» або «крила летючої миші» (рис. 9) [29]. Рентгенологічні зміни розвиваються в середньому через 2 год і прогресують протягом 24–28 год. Симптоми та ознаки: тахіпное, задишка, ціаноз і кровохаркання. Під час фізичного обстеження в пацієнта може спостерігатися ослаблення дихальних шумів і крепітація внаслідок підшкірного повітря. Наявна гіпоксія (сатурація кисню < 90 % при диханні кімнатним повітрям), яка досягає найнижчого рівня протягом перших 24 год. Центральне розташування інфільтратів може допомогти відрізнити вибухове ураження легень від контузії легень унаслідок удару об тупі предмети, яка зазвичай спричиняє периферичні ураження. Крім того, рентгенографія може

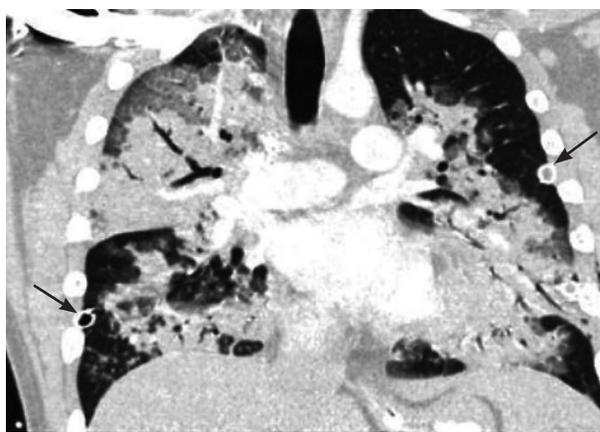


Рис. 9. Вибухове ураження легень

Комп'ютерна томографія органів грудної клітки з коронарним контрастуванням демонструє двобічне помутніння повітряного простору за типом «крила летючої миші» в потерпілого, який перебував у безпосередній близькості від детонованого саморобного вибухового пристрою [29].

виявити пневмоторакс (рис. 10 та 11) [13], пневмомедіастинум, гемоторакс, переломи ребер, сторонні тіла (не всі сторонні тіла є рентгенконтрастними) [2].

Важливим етапом в оцінці клінічного стану пацієнта є стратифікація ризику на підставі анамнезу, активного опитування про симптоматику та ретельного фізикального обстеження з рентгенографією органів грудної клітки, якщо симптоми або результати фізикального обстеження відповідають вибуховій травмі легень. Вибухове ураження легень слід діагностувати за наявності у хворого задишки або кровохаркання, гіпоксії, легеневих інфільтратів, пневмотораксу чи пневмомедіастинуму без проникного чи тупого поранення грудної клітки.

Якщо дозволяє ситуація, цілеспрямований анамнез допомагає лікарю зі стратифікацією ризику щодо первинної вибухової травми (рис. 12). Ідеальна (хоча рідко доступна) історія має містити такі дані:

1. Особливості вибухового пристрою: тип і вага вибухівки, саморобна чи комерційно доступна, час детонації тощо.
2. Географія: розташування пристрою, детонація на відкритому чи в закритому просторі, навколишні структури.
3. Потерпілий: віддаленість потерпілого від вогнища детонації, конкретне розташування потерпілого з орієнтацією тіла щодо вибухівки та навколишніх конструкцій, чи застосовував засоби індивідуального захисту.
4. Статус інших постраждалих: причини будь-яких смертей на місці події, первинні вибухові травми інших постраждалих, що вижили.

Ці дані в порядку важливості в анамнезі пацієнта можуть визначити ймовірність первинної вибухової травми. Подробиці про вибуховий пристрій, наприклад, тип і вага, можуть бути корисними. Більша потужніша вибухівка з більшою ймовірністю створить тривалий надлишковий тиск, що може спричинити первинне пошкодження вибухом на відстані від центру детонації. Можна очікувати, що комерційно доступні вибухові речовини спричинять передбачуваніші моделі травм на відміну від саморобних вибухових пристроїв, які сильно відрізняються за корпусами, типами та кількістю вибухівки. Час детонації дає змогу визначити час травми та поточний гемодинамічний статус пацієнта.

Підсилення вибухової хвилі відбувається, коли вона відбивається від фіксованих структур і всередині закритої конструкції. Ці складні взаємодії вибухової хвилі та довкілля збільшують ймовірність первинного вибухового ураження в

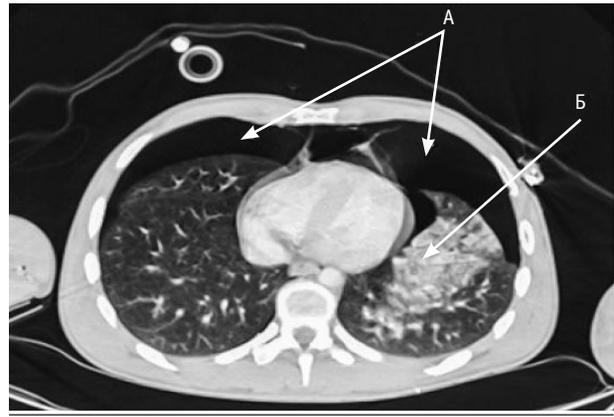


Рис. 10. Комп'ютерна томографія, проведена приблизно через 1 год після травми

Зріз грудної клітки молодого чоловіка, який зазнав дії вибухового пристрою, установленого в автомобілі. Візуалізуються двобічний пневмоторакс (А) і первинне вибухове ураження лівої легені (Б) [13].

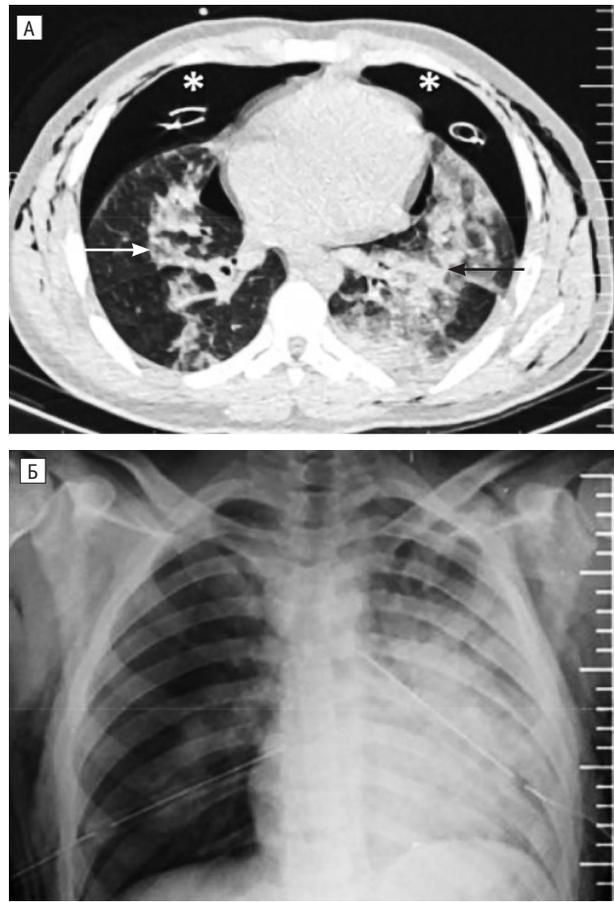


Рис. 11. Комп'ютерна томографія пацієнта віком 28 років із первинними вибуховими ушкодженнями

Аксіальне зображення (А) демонструє розташовані в центрі забої легень, схожі на метелика (стрілки), двобічний пневмоторакс (зірочки) і підкріпну емфізему. Рентгенограма грудної клітки (Б): сильні забої обох легень [13].

закритих просторах. З цієї причини може бути корисним визначення місця вибуху (закритий чи відкритий простір). Жертви, які перебували ближче до місця вибуху, мають більше шансів

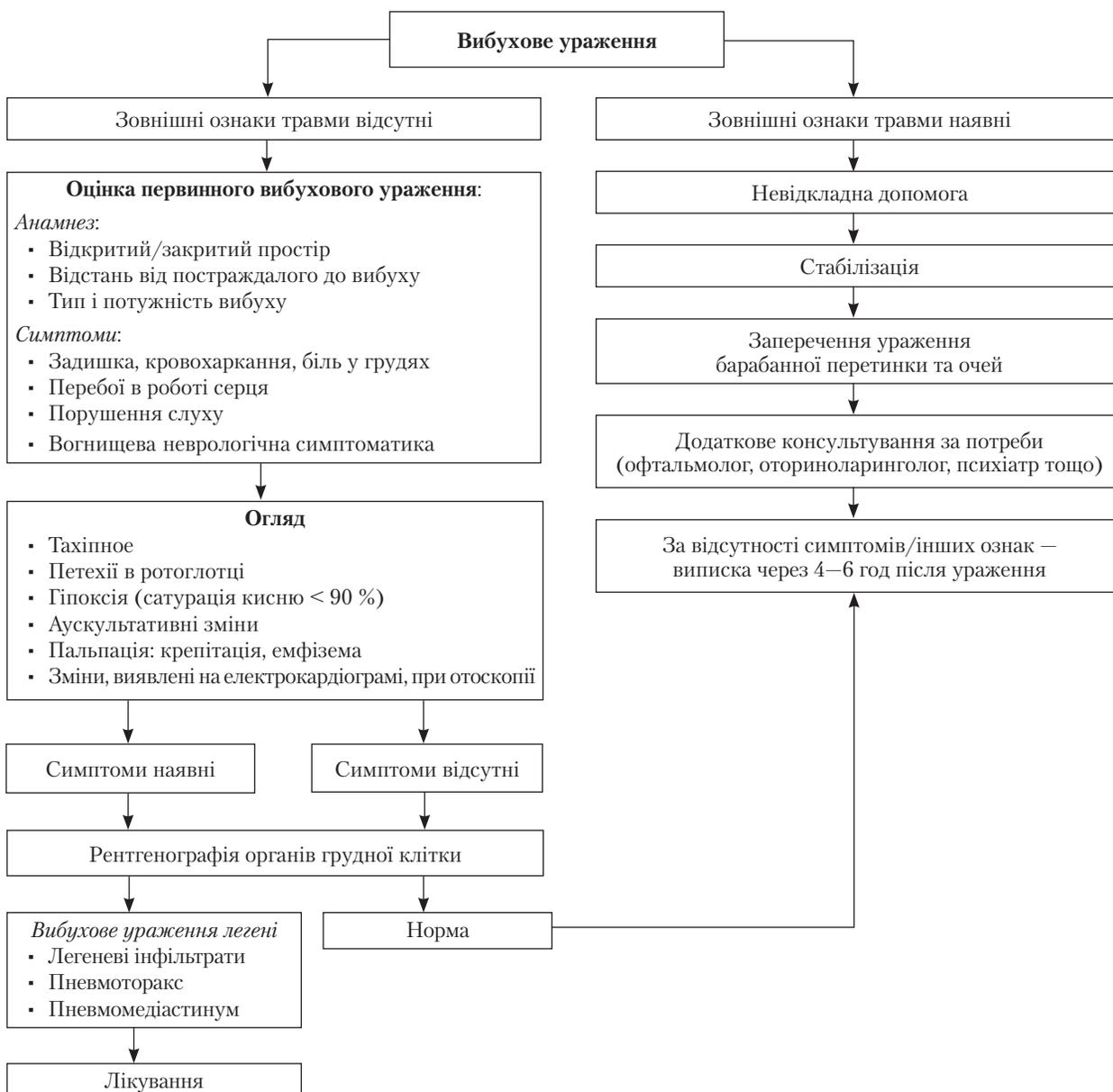


Рис. 12. Алгоритм ведення пацієнтів із вибуховим ураженням [37]

отримати первинну вибухову травму, оскільки вони зазнали більшого надмірного тиску, ніж ті, хто перебував далі. Орієнтація тіла потерпілого щодо вибухівки та навколишніх конструкцій може допомогти визначити схему травм. Наприклад, очікується, що вухо або легеня, розташовані ближче до місця вибуху, будуть пошкоджені раніше за контралатеральні. Однак це може не стосуватися пацієнта, який стоїть біля стіни або в закритому просторі.

Якщо немає детального анамнезу, то опіки пов'язують із підвищеною частотою первинної вибухової травми. Термічне ураження внаслідок вибуху може виникнути в результаті впливу вибухової вогняної кулі або внаслідок пожежі. Пацієнти зі спалаховими опіками від впливу вогняної кулі, ймовірно, перебували достатньо

близько, щоб отримати травму від впливу надмірного тиску. Тому клініцисти мають запідозрити первинне вибухове ушкодження в пацієнтів, які отримали опіки.

Насамперед постраждалому в зоні вибуху слід поставити такі запитання:

1. *Ви мене чуєте? У вас болить вухо?*

Розрив барабанної перетинки й тимчасова втрата слуху є поширеним явищем при вибуховій травмі.

2. *Ви задихаєтесь? Ви відчуваєте задишку під час ходьби?*

Забій легень перешкоджає дифузії кисню та спричиняє задишку. Пневмоторакс і гемоторакс можуть зменшувати об'єм вдихуваного повітря, що призводить до суб'єктивної задишки. Шок з інших причин може спричинити відчуття задиш-

ки внаслідок лактоацидозу через погану перфузію тканин.

3. У вас болить грудна клітка?

Біль у грудній клітці може виникати внаслідок проникної або тупої травми, пневмотораксу, пневмомедіастинуму, ішемії чи інфаркту міокарда через повітряну емболію коронарних судин.

4. У вас є нудота, біль у животі, позиви до дефекації, кров у калі?

Проникна або тупа травма живота може спричинити біль, або у пацієнта може бути первинне вибухове поранення виповнених газом органів черевної порожнини, розрив товстої або тонкої кишки.

5. У вас болять очі або є проблеми із зором?

Якщо пацієнт був одягнений у бронезилет, це необхідно зазначити в протоколі. Хоча бронезилет гарантує значний захист від осколкових поранень, він також збільшує ймовірність і тяжкість первинного вибухового ушкодження.

Початкова допомога пацієнтам із підозрюваним вибуховим ураженням легень подібна до допомоги при травмах:

- негайно визначте та усуньте небезпечний для життя зовнішній крововилив. Це найпоширеніша причина смерті на полі бою, якій можна запобігти наклавши турнікет або джгут;
- поранення вуха та шлунково-кишкового тракту не потребують особливого догляду в польових умовах;
- швидка евакуація підвищує шанс на виживання;
- не намагайтеся забезпечити остаточну допомогу під час сортування;
- не намагайтеся проводити масштабну реанімацію в польових умовах (серцево-легенева реанімація на місці масової катастрофи не показана);
- зменшити до мінімуму фізичну активність постраждалих від вибуху. Навантаження може збільшити тяжкість первинної вибухової травми та призвести до смерті;
- ранні (тобто польові) нормальні показники життєдіяльності можуть бути неточним орієнтиром щодо тяжкості травми в пацієнтів із вибуховим ураженням легень, баротравмою та/або крововиливом і розривом виповнених газом порожнистих органів;
- аритмії (особливо брадикардія), артеріальна гіпотензія, апное часто спостерігаються після вибухової травми грудної клітки та пов'язані з первинним впливом вибухової хвилі на міокард і вагусною стимуляцією.

Часто у постраждалих від вибухової травми може спостерігатися артеріальна гіпотензія, яка є наслідком:

- крововтрати через зовнішні поранення;

- втрати крові внаслідок шлунково-кишкової кровотечі;
- крововтрати внаслідок внутрішньочеревного розриву органа;
- гіпотензії від здавлення судин і серця пневмотораксом;
- гіпотонії внаслідок серцево-судинних наслідків повітряної емболії;
- артеріальної гіпотензії внаслідок вагусних рефлексів.

Вибухове ураження легень лікують шляхом корекції наслідків баротравми, якщо такі виявлені. За можливості додаткову оксигенотерапію слід розпочинати будь-якому пацієнту, який не має нормальної сатурації кисню або не може її підтримувати, а також тим, хто має будь-які зовнішні пошкодження.

Класичні принципи лікування вибухової травми легень на стаціонарному етапі полягають у тому, щоб уникати вентиляції з позитивним тиском, якщо можливо, звести до мінімуму вентиляцію з позитивним тиском у кінці видиху та використовувати розумні стратегії інфузійної терапії. Вентиляція з обмеженим тиском, контрольованим об'ємом із дозволеною гіперкапнією рекомендована пацієнтам із ураженням легень, щоб мінімізувати середній тиск у дихальних шляхах, ймовірність повітряної емболії та зменшити ризик подальшої легеневої травми [30]. Також успішно застосовувати високочастотну вентиляцію та інгаляції оксиду азоту [2]. Інші складні режими, такі як вентиляція зі зниженим тиском у дихальних шляхах, струменева вентиляція, коливальна вентиляція та незалежна вентиляція легень, можуть бути корисними. Коли все інше не допомагає, лікар може вдатися до методів порятунку, таких як екстракорпоральна мембранна оксигенація.

Висновки

Вибухове ураження легень є однією з найпоширеніших причин смертності постраждалих від вибуху. Лікування вибухових травм слід здійснювати мультидисциплінарною командою, до складу якої входять хірург-травматолог, загальний хірург, ЛОР-спеціаліст, офтальмолог, пластичний хірург, анестезіолог, реаніматолог, лікар відділення невідкладної допомоги та інші спеціалісти за потреби. Також цим пацієнтам рекомендована консультація щодо психічного здоров'я, оскільки в них можуть виникнути гострий стресовий розлад, порушення адаптації та посттравматичний стресовий розлад. Якщо травма незначна, то пацієнта можна спостерігати 6–8 год і виписати. Усіх осіб із серйозними вибуховими травмами слід госпіталізувати та контролювати. Для них передбачена подовжена фаза реабілітації.

Конфлікту інтересів немає.

Участь авторів: концепція і дизайн дослідження — О.С. Шевченко; збір матеріалу — І.А. Овчаренко; опрацювання матеріалу — В.І. Петренко; написання тексту — О.О. Погорелова; опрацювання даних — Р.С. Шевченко; редагування тексту — Л.Д. Тодоріко.

Список літератури

- Almogly G, Luria T, Richter E, et al. Can external signs of trauma guide management? *Arch Surg.* 2005;140:390-3. doi: 10.1001/archsurg.140.4.390.
- Avidan V, Hersch M, Armon Y, et al. Blast lung injury: Clinical manifestations, treatment and outcome. *Am J Surg.* 2005;90:927-31. doi: 10.1016/j.amjsurg.2005.08.022.
- Baker SP, O'Neill B, Haddon W, Long WB. The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. *J Trauma.* 1974;14(3):187-96. doi: 10.1097/00005373-197403000-00001.
- Bieler D, Franke A, Kollig E, Gusgen C, Mauser M, Friemer B, Achatz G. Terrorist attacks: common injuries and initial surgical management. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2020;46:683-94. doi: 10.1007/s00068-020-01342-z.
- Brevard SB, Champion H, Katz D. Chapter 2: Weapon Effects. In Savitsky, Eric et al. *Combat Casualty Care: Lessons Learned from OEF and OIF.* Fort Detrick, Md: Office of the Surgeon General, Department of the Army, U.S.; 2012. Print. <https://archive.org/details/CombatCasualtyCare/page/n35/mode/2up>.
- Cernak I, Noble-Haesslein LJ. Traumatic brain injury: an overview of pathobiology with emphasis on military populations. *J Cereb Blood Flow Metab.* 2010 Feb;30(2):255-66. doi: 10.1038/jcbfm.2009.203.
- Chavko M, Adeeb S, Ahlers ST, McCarron RM. Attenuation of pulmonary inflammation after exposure to blast overpressure by n-acetylcysteine amide. *Shock.* 2009;32(3):325-31. doi: 10.1097/SHK.0b013e31819c38f1.
- Chen H-J, Xu C, Li Y, et al. An open air research study of blast-induced traumatic brain injury to goats. *Chinese J Traumatol.* 2015;18:267-74. doi: 10.1016/j.cjtee.2015.11.006.
- Covey DC, Born CT. Blast injuries: mechanics and wounding patterns. *J Surg Orthop Adv.* 2010 Spring;19(1):8-12. PMID: 20371000.
- Cudhay E. The effects of underwater blast on divers. *Naval Submarine Medical Research Laboratory, Groton;* 2001. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA404719.pdf>.
- Edirisinghe A, Kitulwatte I. Injury, fatal and nonfatal: explosive injuries. *Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine.* 2016:335-67. doi: 10.1016/B978-0-443-21441-7.00287-9.
- Elsayed NM. Toxicology of blast overpressure. *Toxicology.* 1997;121:1-15. doi: 10.1016/S0300-483X(97)03651-2.
- Er S, Tahtabasi M. Thoracoabdominal injuries after a bomb explosion: blast injuries and their clinical effects. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2022;48(1):1-10. doi: 10.1007/s00068-020-01539-2.
- Explosive weapon effects. Final report. GICHD: Geneva; February 2017. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/Explosive_weapon_effects_web.pdf.
- Federal Emergency Management Agency. *Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. Providing Protection to People and Buildings.* 2003. 108 p. <https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2018/10/FEMA%20Primer%20for%20Design%20of%20Commercial%20Buildings%20to%20Mitigate%20Terrorist%20Attacks.pdf>.
- Greer AD. Numerical modeling for the prediction of primary blast injury to the lung. Ontario, Canada: University of Waterloo; 2006. <http://hdl.handle.net/10012/2642>.
- Guzzi LM, Argyros G. The management of blast injury. *European J Emerg Med.* 1996;3:252-5. doi: 10.1097/00063110-199612000-00007.
- Hirsch M, Bazini J. Blast injury of the chest. *Clin Radiol.* 1969;20(4):362-70. doi: 10.1016/s0009-9260(69)80087-5.
- Ho AM. A simple conceptual model of primary pulmonary blast injury. *Med Hypotheses.* 2002;59:611-3. doi: 10.1016/S0306-9877(02)00153-6.
- Ho AM, Ling E. Systemic air embolism after lung trauma. *Anesthesiol.* 1999;90:564-75. doi: 10.1097/0000542-199902000-00033.
- Institute of Medicine (US) Committee on Gulf War and Health: *Health Effects of Serving in the Gulf War, Update 2009.* Gulf War and Health: Vol. 8: Update of Health Effects of Serving in the Gulf War. Washington (DC): National Academies Press (US); 2010. doi: 10.17226/12835.
- Josey T. Investigation of blast load characteristics on lung injury. Ontario, Canada: University of Waterloo; 2010. 219 p. <http://hdl.handle.net/10012/5053>.
- Lance RM. Human injury criteria for underwater blasts. San Diego: University of California; 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0143485.
- Leibovici D, Gofrit ON, Stein M, et al. Blast injuries: Bus versus open-air bombings — a comparative study of injuries in survivors of open-air versus confined-space explosions. *J Trauma.* 1996;41:1030-5. doi: 10.1097/00005373-199612000-00015.
- Mellor SG, Cooper GJ. Analysis of 828 servicemen killed or injured by explosion in Northern Ireland 1970–1984: The Hostile Action Casualty System. *Br J Surg.* 1989;76(10):1006-10. doi: 10.1002/bjs.1800761006.
- Ohnishi Kirkman ME, Guy RJ, Watkins PE. Reflex nature of the cardiorespiratory response to primary thoracic blast injury in the anaesthetised rat. *Exp Physiol.* 2001;86(3):357-64. doi: 10.1113/eph8602145.
- Regan RF, Panter SS. Neurotoxicity of hemoglobin in cortical cell culture. *Neurosci Lett.* 1993 Apr 30;153(2):219-22. doi: 10.1016/0304-3940(93)90326-g.
- Schardin H. *The Physical Principles of the Effects of a Detonation; German Aviation Medicine, World War II.* Department of the US Air Force, Office of the Surgeon General: Washington, DC, USA; 1950. P. 1207-1224.
- Singh AK, Ditkofsky NG, York JD, et al. Blast injuries: from improvised explosive device blasts to the Boston Marathon bombing. *Radiographics.* 2016;36(1):295-307. doi: 10.1148/rg.2016150114.
- Sorkine P, Szold O, Kluger Y, et al. Permissive hypercapnea ventilation in patients with severe pulmonary blast injury. *J Trauma.* 1998; 45:35-8. doi: 10.1097/00005373-199807000-00006.
- Stevenson M, Segui-Gomez M, Lescohier I, Di S, McDonald-Smith G. An overview of the injury severity score and the new injury severity score. *Injury Prevention. Inj Prev.* 2001 Mar;7(1):10-3. doi: 10.1136/ip.7.1.10.
- Stewart C. Blast injuries: true weapons of mass destruction. University of Oklahoma, Tulsa; 2010.
- Stuhmiller JJ. Blast injury: translating research into operational medicine. United States Army Medical Research and Materiel Command. Fort Detrick, Maryland. 2008. 42 p. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA506843.pdf>.
- The Association for the Advancement of Automotive Medicine. *Abbreviated Injury Scale (AIS) 2015.* Chicago, IL: The Association for the Advancement of Automotive Medicine; 2016. <https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/>.
- Wolf SJ, Bebartha VS, Bonnett CJ, Pons PT, Cantrill SV. Blast injuries. *Lancet* 2009;374:405-15. doi: 10.1016/s0140-6736(09)60257-9.
- Yeh DD, Schecter WP. Primary blast injuries - an updated concise review. *World J Surg.* 2012;36:966-72. doi: 10.1007/s00268-012-1500-9.
- Zhao Y, Zhou Y-G. The past and present of blast injury research in China. *Chinese J Traumatol.* 2015;18(4):194-200. doi: 10.1016/j.cjtee.2015.11.001.

O.S. Shevchenko¹, L.D. Todoriko², V.I. Petrenko³, R.S. Shevchenko¹, I.A. Ovcharenko¹, O.O. Pohorielova⁴

¹Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

²Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

³Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

⁴Municipal Non-Profit Enterprise of the Kharkiv Regional Council «Regional Clinical Psychiatric Hospital No. 3», Kharkiv, Ukraine

Explosive Lung Injury (Review)

Modern patterns of terrorist activity and military operations worldwide have increased the potential casualties associated with explosions. However, few civilian doctors have experience in the treatment of patients with blast injuries, which highlights the need to improve knowledge about the physics, pathogenesis of blast injury and other associated types of injuries that may occur.

Objective – to describe the main mechanisms of blast lung injury development and algorithms for the diagnosis and clinical management of such patients.

Materials and methods. A total of 528 literature sources in the PubMed database were analysed for the key words «Blast lung injury» and 35 of them were selected for detailed further analysis.

Results and discussion. Blast lung injury is a major cause of morbidity and mortality in explosion victims both at the scene and among the first survivors. Blast impact on the lungs results in rupture, haemorrhage, contusion and oedema, with subsequent ventilation-perfusion disorders. Blast lung injury is a clinical diagnosis characterised by respiratory distress and hypoxia, which may occur without apparent external chest injury.

Conclusions. Blast lung injury is one of the most common causes of death in blast victims. Blast injuries should be managed by a multidisciplinary team that includes a trauma surgeon, general surgeon, ENT specialist, ophthalmologist, plastic surgeon, anaesthesiologist, intensive care physician and emergency department physician, and other specialists as needed. Mental health counselling is also recommended for these patients, as the development of acute stress disorder, adjustment disorders and post-traumatic stress disorder cannot be ruled out. If the injury is minor, the patient can be observed for 6–8 hours and discharged. However, all serious blast injuries require hospitalisation and monitoring; in addition, they have an extended rehabilitation phase.

Keywords: blast lung injury, combat-related injury, thoracic injury.

Контактна інформація / Corresponding author

Шевченко Ольга Станіславна, д. мед. н., проф. кафедри інфекційних хвороб, дитячих інфекційних хвороб та фізіатрії

<https://orcid.org/0000-0002-5476-3981>

61062, м. Харків, просп. Науки, 4

E-mail: os.shevchenko@knmu.edu.ua

Стаття надійшла до редакції / Received 01.04.2025.

Стаття рекомендована до опублікування / Accepted 06.06.2025.

Стаття опублікована / Published 30.10.2025.

ДЛЯ ЦИТУВАННЯ

- Шевченко ОС, Тодоріко ЛД, Петренко ВІ, Шевченко РС, Овчаренко ІА, Погорелова ОО. Вибухове ураження легень (огляд літератури). Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2025;4:101-113. doi: 10.30978/TB2025-4-101.
- Shevchenko OS, Todoriko LD, Petrenko VI, Shevchenko RS, Ovcharenko IA, Pohorielova OO. Explosive Lung Injury (Review). Tuberculosis, Lung Diseases, HIV Infection (Ukraine). 2025;4:101-113. <http://doi.org/10.30978/TB2025-4-101>. Ukrainian.