

УДК 616.381-003.219:616.136.1-091.8-008.5]-092.9
DOI: 10.24061/1727-0847.24.4.2025.65

М. Ю. Кріцак

Кафедра хірургії факультету післядипломної освіти (зав. – проф. І. Я. Дзюбановський) Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, м. Тернопіль

ДИНАМІКА ЗМІН ГЕМОМІКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА ДІАФРАГМИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПНЕВМОПЕРИТОНЕУМУ СТАНДАРТНОГО ТИСКУ

Резюме. Створення пневмоперитонеуму стандартного тиску призводить до краніального зміщення купола діафрагми, що змінює її архітекtonіку та викликає розтягнення м'язових волокон. Проте найбільш вразливою ланкою в цій системі є гемомікроциркуляторне русло, стан якого визначає життєздатність тканини та її здатність до відновлення у післяопераційному періоді.

Метою роботи було провести морфометричну оцінку параметрів гемомікроциркуляторного русла ребрової та поперекової частин діафрагми при застосуванні стандартного тиску пневмоперитонеуму в динаміці. Експериментальне дослідження виконане на 55 тваринах, яких розподілили на 4 групи. І група – контрольна група, яким не моделювалась жодна патологія. Перша, друга та третя дослідна групи, де моделювався пневмоперитонеум стандартного тиску відповідно впродовж 1, 3 та 5 годин. Після чого відбиралась діафрагма і досліджувались морфометричні показники.

У результаті аналізу морфометричних параметрів встановлено, що через п'ять годин створених експериментальних умов відбувається зменшення діаметра артеріол на 15,7% і 16,5%, діаметра передкапілярних артеріол на 15,5% і 10,5%, діаметра гемокапіляра на 17,2% і 21,8% у ребровій та поперековій частинах відповідно. На цьому терміні відбувалось збільшення діаметра закапілярних венул на 21,1% та 22,7%, діаметра венул на 17,1% та 17,6% відповідно у ребровій та поперековій частинах. Щільність капілярного русла зменшується у ребровій частині на 12,9% і у поперековій на 12,8%. Дані вказують на ключовий патогенетичний механізм, який визначає розвиток ішемії тканин та венозного повнокров'я. Пневмоперитонеум стандартного тиску призводить до виражених морфометричних параметрів гемомікроциркуляторного русла, які характеризуються звуженням приносної ланки і розширенням виносної ланки мікросудин ребрової та поперекової частин діафрагми.

Ключові слова: пневмоперитонеум, стандартний тиск, діафрагма, морфометрія, експеримент, щурі.

Переваги лапароскопічної хірургії добре відомі та включають зменшення післяопераційного болю, скорочення тривалості перебування в лікарні та кращі косметичні результати. У галузі хірургії печінки використання лапароскопії значно збільшилося за останні роки. Недоліки, пов'язані з цим видом хірургії, включають тривалий час операції та підвищення внутрішньочеревного тиску [1, 2]. Лапароскопічні хірургічні втручання зазвичай виконуються шляхом нагнітання (інсуфляції) в черевну порожнину вуглекислого газу (CO_2), щоб дозволяє створити простір всередині, щоб візуалізувати органи та структури всередині для проведення операції. Тиск газу, який використовується для інсуфляції, зазвичай становить від 12 мм рт. ст. до 16 мм рт. ст., який прийнято називати стандартним тиском. Однак це призводить до змін кровообігу та може бути шкідливим [3-5].

Підвищення внутрішньочеревного тиску з постійним стисканням внутрішньочеревних органів, потенційно впливає на перфузію їх мікроциркуляторного русла [6]. Вплив CO_2 має негативний вплив на перитонеальну мікроциркуляцію та системи клітинного захисту, що є передбачуваними механізмами утворення спайок. Уникнення тривалого впливу CO_2 та рясне зрошення черевної порожнини впродовж усієї операції може зменшити ці ефекти [7]. Попри очевидні переваги, штучне підвищення внутрішньочеревного тиску навіть до стандартних значень супроводжується низкою системних та місцевих патофізіологічних ефектів, механізми яких досі залишаються предметом дискусій [5].

Нині доведено, що мікроциркуляція є найбільш чутливим індикатором гомеостазу. При стандартному тиску пневмоперитонеуму (ПП) відбувається здавлення капілярної сітки, утруднення

венозного відтоку та порушення трансапілярного обміну. Це запускає каскад патологічних змін: від ендотеліальної дисфункції та набряку до розвитку гіпоксії м'язової тканини. Особливу актуальність це питання набуває в контексті ішемічно-реперфузійного синдрому, коли після десуфляції (виведення газу) відбувається різке відновлення кровотоку, що може спричинити додаткове оксидативне пошкодження клітин [8, 9].

У структурі морфо-функціональних змін при ПП особливе місце посідає діафрагма. Будучи головним дихальним м'язом, вона першою зазнає прямого механічного впливу з боку черевної порожнини. Підвищення тиску призводить до критичного зміщення купола діафрагми, що змінює її архітектуру та викликає розтягнення м'язових волокон. Проте найбільш вразливою ланкою в цій системі є гемомікроциркуляторне русло (ГМЦР), стан якого визначає життєздатність тканини та її здатність до відновлення у післяопераційному періоді [10, 11].

Більшість існуючих досліджень фокусуються на загальних гемодинамічних показниках (артеріальний тиск, серцевий викид) або респіраторній функції. Проте, кількісна оцінка перебудови саме судинного русла діафрагми на мікроскопічному рівні – діаметрів артерій, капілярів та венул, щільності судинної сітки, стану ендотеліоцитів – залишається фрагментарною. Відсутність чітких морфометричних критеріїв норми та патології за умов стандартного ПП ускладнює прогнозування можливих післяопераційних ускладнень, таких як дихальна недостатність або дисфункція діафрагми.

Отже, необхідність глибокого вивчення динаміки змін ГМЦР діафрагми диктується потребою практичної медицини у безпечному веденні пацієнтів під час лапароскопічних операцій. Розуміння морфологічного субстрату судинних розладів дозволить не лише теоретично обґрунтувати патогенез впливу ПП на організм, а й у перспективі розробити методи фармакологічної або технічної корекції цих змін (наприклад, застосування режимів «низького тиску»). Використання експериментальних моделей дозволяє детально проаналізувати ультраструктурні зміни, які неможливо оцінити в клінічних умовах на людях.

Мета дослідження: дати морфометричну оцінку стану гемомікроциркуляторного русла ребрової та поперекової частин діафрагми при застосуванні стандартного тиску пневмоперитонеуму в динаміці.

Матеріал і методи. З метою вирішення поставленої мети, нами відібрано 55 здорових статевозрілих щурів, віком 6 місяців, масою

($230,0 \pm 20,0$) г, які розподілені на 4 групи, контрольну і 3 дослідними. У контрольну групу (КГ) увійшли 10 особин, яким не проводилось жодного моделювання будь-якої патології і показники якої, слугували за норму і мірою порівняння із дослідними. У дослідних групах (ДГ) проводили моделювання ПП упродовж 1, 3 та 5 годин відповідно в I ДГ, II ДГ та III ДГ. Всі етапи експериментального дослідження було виконано в умовах віварію Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського. Експериментальне дослідження проводилось за світлового дня в приміщенні при температурі 20-22 °C і відносній вологості 60-80%.

Тварин дослідних груп перед проведенням анестезії забирали корм із клітки, не годували впродовж 12 годин перед першою ін'єкцією, але забезпечували вільний доступ до води. За дві години до анестезії воду відміняли також, забирали поїлки із клітки. За 15 хв до введення основного препарату використовували Ксилазин у дозі 10 мг/кг. По проходженні даного терміну проводилась внутрішньом'язова ін'єкція Кетаміну у дозі 90 мг/кг. Тварин фіксували на столику в положенні лежачи на спині. Під час анестезії, контролювалась температура тіла кожного щура та підтримувалась температуру в межах норми 35,5-37,5 °C.

Перед проведенням лапароцентезу, голкою Вереша черевну стінку голили, та тричі проводили обробку операційного поля антисептиками, обкладали стерильними салфетками. Після чого здійснювали невеличкий (2,0-3,0 мм) розріз лише шкіри. Голку Вереша вводили в черевну порожнину під прямим кутом через дану томію шкіри. Переконавшись, що кінець голки із мандреном у черевній порожнині. Після чого канюлю голки з'єднували із інсуфлятором KARL STORZ electronic laparoflator 264300 20 через гумову трубку. Він автоматично вдуває газ, щоб внутрішньочеревний тиск підтримувався на бажаному рівні. На приладі виставляли показник тиску на рівні 10 мм. рт. ст. Такий параметр тиску відповідає стандартному тиску лапароскопічної операції на людському організмі.

Після закінчення відповідного терміну згідно номера групи проводили забір макропрепарата діафрагми. З даного органу виділялись окремо реброва та поперекова частини діафрагми, які фіксували на картоні і занурювали в 10% розчин нейтрального формаліну. Матеріал зневоднювали в етилових спиртах зростаючої концентрації та заливали у парафін. З кожного парафінового блоку виготовляли гістологічні зрізи, які після депарафінізації фарбували. Обробка результатів виконана в про-

грамному пакеті Statsoft STATISTIKA. Вивчали: діаметр артеріоли (ДА); діаметр передкапілярної артеріоли (ДПА); діаметр гемокапіляра (ДГ); діаметр закапілярної вени (ДЗВ); діаметр венули (ДВ) та щільність капілярного русла (ЩКР).

Результати дослідження та їх обговорення.

Порівняння цифрових значень морфометричного параметру ДА, які отримані через 1 год в заданих умовах експерименту із показниками контрольної групи шурів, яким не моделювалась патологія, показали що він зменшується на 9,9% у ребровій частині діафрагми (РЧД), демонструючи зменшення із $(16,74 \pm 0,33)$ мкм до $(15,07 \pm 0,21)$ мкм. Аналогічні зміни відбуваються у поперековій частині діафрагми (ПЧД), де відбувається зменшення

із $(16,80 \pm 0,31)$ мкм до $(14,92 \pm 0,25)$ мкм, що відповідало 11,2% (рис. 1). Більше зменшення у ПЧД пов'язуємо із більшою біомеханічною роботою (напруженням) цієї частини.

Через 3 год ПП стандартного тиску відбувається ще більше зменшення цього показника і він демонструє зменшення на 11,5% у ребровій частині і на 12,3% у поперековій частині. Варто зазначити, що дані зміни продемонстрували статистично достовірну різницю де $p < 0,01$. Найбільші зміни нами спостерігались після 5-ти год створених експериментальних умов, де ДА зменшувався від $(16,74 \pm 0,33)$ мкм до $(14,12 \pm 0,11)$ мкм ($p < 0,001$) у РЧД, а у ПЧД відбувались зміни із рівня показника $(16,80 \pm 0,31)$ мкм до $(14,03 \pm 0,19)$ мкм ($p < 0,001$).

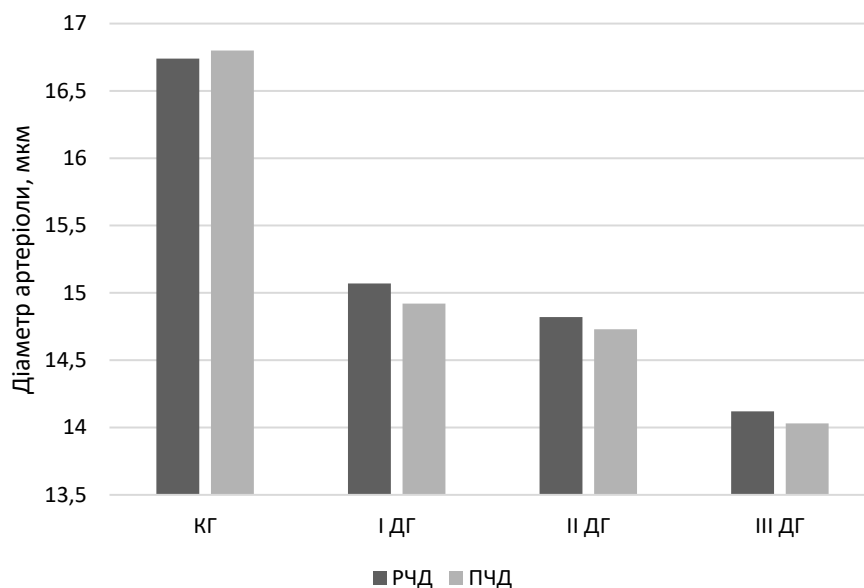


Рис. 1. Динаміка зміни діаметра артеріоли у частинах діафрагми під впливом пневмоперитонеуму стандартного тиску

Помічено аналогічну закономірність у морфометричних показниках ДПА та ДГ, динаміку яких зображено на рисунках 2 і 3. Так, показник ДПА у ребровій частині демонстрував зменшення від $(10,06 \pm 0,37)$ мкм до $(9,88 \pm 0,13)$ мкм після 1 год ПП, до $(9,17 \pm 0,16)$ мкм ($p < 0,01$) після 3-х год і після 5-ти год зменшувався до рівня $(8,70 \pm 0,17)$ мкм ($p < 0,001$). У поперековій ділянці зменшення відбувалось від $(10,08 \pm 0,36)$ мкм до $(9,78 \pm 0,15)$ після 1-ї год, $(9,11 \pm 0,10)$ мкм ($p < 0,01$) після 3-х год, $(9,03 \pm 0,18)$ мкм ($p < 0,001$) після 5-ти год. Слід відмітити, що ми помітили не закономірну зміну показнику після п'ятої години, де він був на 3,7% більшим у ПЧД ніж у РЧД, хоча передбачалось, що ніжки діафрагми страждатимуть більше.

Діаметр гемокапіляру зменшувався на 9,2% після 1-ї год, на 17,1% ($p < 0,05$) після 3-х год та на 17,9% ($p < 0,01$) після 5-ти год. Все вище викладене стосується ребрової частини діафрагми. Щодо

поперекової частини то зміни відбувались у дещо більших межах у меншу сторону. Так, після першої години ПП морфометричний параметр зменшувався на 11,1%, після третьої – на 19,3% ($p < 0,05$), а після п'ятої – на 21,9% ($p < 0,01$) (рис. 2, 3).

Зменшення параметрів приносної ланки ГМЦР при ПП є ключовим патогенетичним моментом, який визначає розвиток ішемії тканин. Це явище обґрунтовується дією кількох взаємопов'язаних механізмів, що описані в сучасній науковій літературі. Зменшення морфометричних показників приносної ланки ГМЦР діафрагми, що спостерігалось в нашому експерименті, узгоджується з даними літератури [12-15]. Це зумовлено синергічною дією механічного стиснення судинної стінки та нейрогуморально детермінованого вазоспазму у відповідь на гіперкапнію, що морфологічно маніфестує звуженням просвіту артеріол та прекапілярів [13].

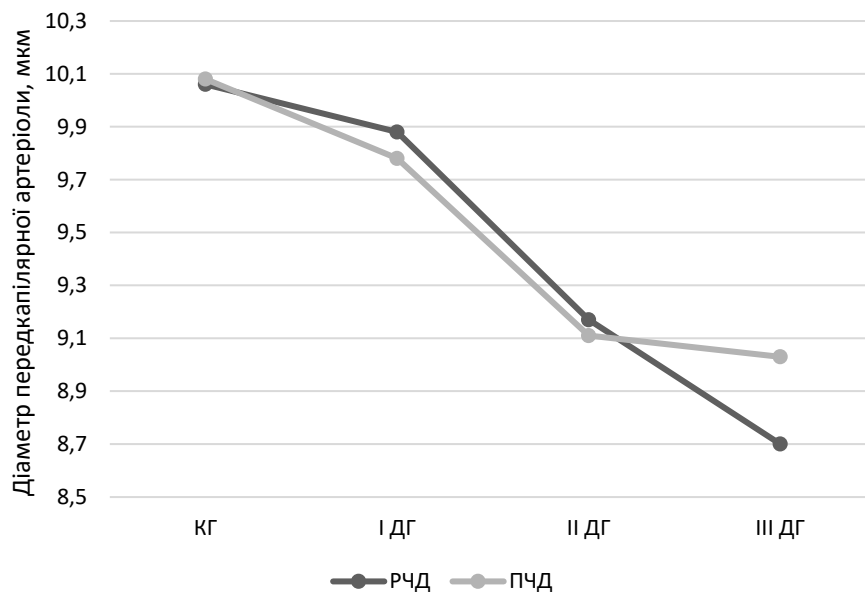


Рис. 2. Динаміка зміни діаметра передкапілярної артеріоли у частинах діафрагми під впливом пневмоперитонеуму стандартного тиску

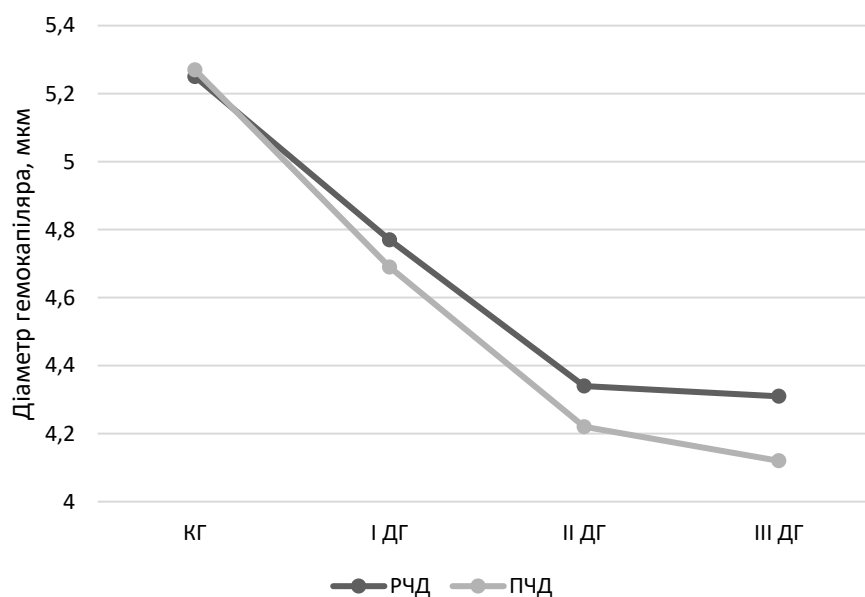


Рис. 3. Динаміка зміни діаметра гемокапіляра у частинах діафрагми під впливом пневмоперитонеуму стандартного тиску

Артеріоли мають розвинену м'язову оболонку, проте при досягненні тиску 10-12 мм рт. ст. зовнішній тиск починає протидіяти внутрішньосудинному. Це призводить до зменшення трансмурального тиску, що призводить до спадання (колапсу) або значного звуження мікросудин, особливо в тканинах, що безпосередньо контактують із ділянкою ПП такі як діафрагма чи очеревина. Різка підвищення зовнішнього тиску сприймається механорецепторами гладком'язових клітин артеріол, як стимул до скорочення для підтримки тонуусу стінки. Це призводить до активного зменшення просві-

ту приносної ланки для обмеження припливу крові в ішемізовану ділянку вазоконстрикція [12, 15].

При аналізі показників виносної ланки ГМЦР встановлено, що діаметри закапілярної венули та венули збільшуються і ці зміни у більшу сторону залежать від тривалості ПП. Встановлено, що після тривалості ПП упродовж 1-ї год ДЗВ збільшився від ($11,80 \pm 0,35$) мкм до ($12,62 \pm 0,23$) мкм, після 3-ї – до ($13,37 \pm 0,26$) мкм ($p < 0,05$), і після 5-ї – до ($15,13 \pm 0,27$) мкм ($p < 0,001$). Все вище сказане стосується ребрової частини діафрагми. Що ж до поперекової частини, то після першої години відбу-

валось збільшення на 8,5%, після 3-ї – на 16,3% ($p < 0,01$), після 5-ї – на 21,8% ($p < 0,001$). Зміни ДВ демонстрували наступні результати у поперековій частині: після 1-ї год збільшувався показник на 7,1%; після 3-ї – на 13,1% ($p < 0,01$); після 5-ї – на 17,6% ($p < 0,001$). Щодо РЧД, то морфометричний параметр ДВ збільшувався із $(27,12 \pm 0,30)$ мкм до $(28,77 \pm 0,35)$ мкм після 1-ї год, до $(30,73 \pm 0,43)$ мкм ($p < 0,01$), після 5-ї – до $(32,70 \pm 0,29)$ мкм ($p < 0,001$).

Збільшення діаметрів виносної ланки (після-капілярних венул та венул) ГМЦР при ПП є класичною ознакою пасивного венозного повнокров'я. Тиск у венулах та дрібних венах лише на кілька мм рт. ст. перевищує внутрішньочеревний тиск. При ПП стандартного тиску зовнішній тиск газу перевищує тиск у венулах, що створює «механічний бар'єр» для відтоку крові до нижньої порожни-

тої вени. Кров накопичується в ємнісних судинах, що призводить до їх компенсаторного та пасивного розширення (дилатації) [15, 16].

Встановлене нами достовірне збільшення діаметрів виносної ланки ГМЦР діафрагми при стандартному тиску ПП свідчить про розвиток венозного стазу. Це узгоджується з концепцією «венозного блоку», описаною у літературі, згідно з якою підвищений внутрішньочеревний тиск перешкоджає адекватному відтоку крові, призводячи до пасивної дилатації ємнісних мікросудин та порушення транскапілярного обміну.

Досліджуючи морфометричний параметр щільності капілярного русла, нами відмічено зменшення показника при ПП, що є одним із найнебезпечніших проявів порушення мікроциркуляції. Динаміку змін зображено на рисунку 4.

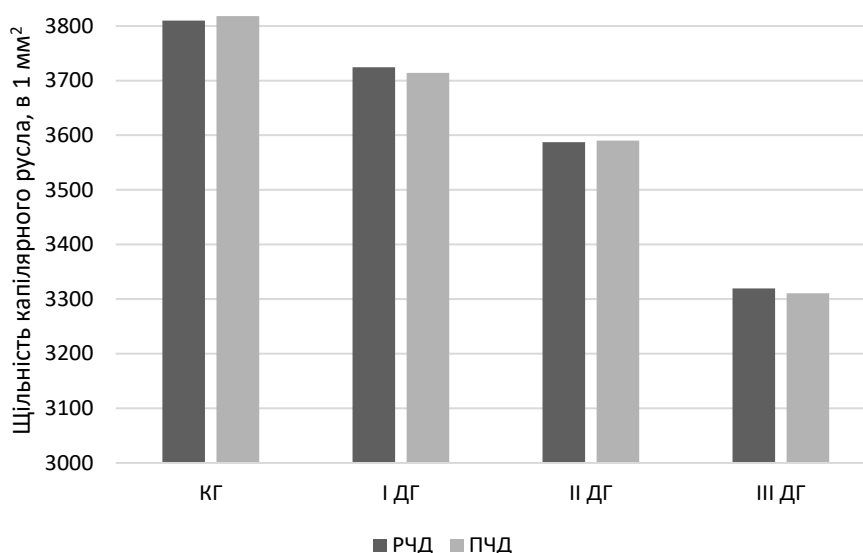


Рис. 4. Динаміка зміни щільності капілярного русла у частинах діафрагми під впливом пневмоперитонеуму стандартного тиску

У ребровій частині діафрагми ШКР зменшувалась після 1-ї год на 2,3%, після 3-ї – на 5,9% ($p < 0,01$), після 5-ї – на 12,9% ($p < 0,001$). У поперековій частині зменшення відбувалось у наступних межах: після 1-ї год на 3,8%; після 3-ї – на 6,0% ($p < 0,01$); після 5-ї – на 12,8% ($p < 0,001$).

Капіляри, на відміну від артерійол, не мають м'язового шару і характеризуються найнижчим внутрішньосудинним тиском. Зовнішній тиск газу в черевній порожнині легко перевищує критичний тиск закриття капіляра. Як наслідок, значна частина капілярів просто сплющується. На гістологічних препаратах такі судини стають невидимими, оскільки в них припиняється рух еритроцитів, що фіксується як зменшення щільності русла. Плазма крові виходить у міжклітинний простір. Оскільки діафрагма – це щільний м'яз, набрякова рідина накопичується навколо мікросудин, створюючи

додатковий тиск з боку інтерстицію. Це створює ділянки ішемії, де м'язові волокна не отримують кисню. Ці зміни свідчать про критичне зниження резервних можливостей мікроциркуляції та формування морфологічного підґрунтя для ішемічного пошкодження м'язових волокон діафрагми.

Висновок. Пневмоперитонеум стандартного тиску призводить до виражених змін морфометричних параметрів гемомікроциркуляторного русла, які характеризуються звуженням приносної ланки і розширенням виносної ланки мікросудин ребрової та поперекової частин діафрагми. Найбільш виражені зміни відбуваються після п'яти години створеного внутрішньочеревного тиску. На що вказувало зменшення діаметра артерійол на 15,7% і 16,5%, діаметра передкапілярних артерійол на 15,5% і 10,5%, діаметра гемокапіляра на 17,2% і 21,8% відповідно у ребровій та поперековій час-

тинах. На цьому терміні відбувалось збільшення діаметра закапілярних венул на 21,1% та 22,7%, діаметра венул на 17,1% та 17,6% відповідно у ребровій та поперековій частинах. Щільність капілярного русла зменшувалась у ребровій частині на 12,9% і у поперековій на 12,8%.

Перспективи подальших досліджень. Дані цього дослідження сприяють початку дослідження змін параметрів при використанні низького тиску, як основного напрямку публікацій останніх років та порівняння їх із даними при стандартному тиску.

Список використаної літератури

1. Haneef AK, Aljohani EA, Alzahrani RS, Alowaydhi HM, Alarif GA, Bukhari MM, et al. Active gas aspiration in reducing pain after laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Surg Endosc.* 2024 Feb;38(2):597-606. doi: 10.1007/s00464-023-10651-4.
2. Yao J, Qin S, Yang G. Comparison of the therapeutic effects of different pneumoperitoneum pressures on laparoscopic transabdominal preperitoneal hernia repair: a randomized controlled trial. *Acta Cir Bras.* 2024 Dec 6;39: e399824. doi: 10.1590/acb399824.
3. Ortenzi M, Montori G, Sartori A, Balla A, Botteri E, Piatto G, et al. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Surg Endosc.* 2022 Oct;36(10):7092-113. doi: 10.1007/s00464-022-09201-1.
4. Chang W, Yoo T, Cho WT, Cho G. Comparing postoperative pain in various pressure pneumoperitoneum of laparoscopic cholecystectomy: a double-blind randomized controlled study. *Ann Surg Treat Res.* 2021 May;100(5):276-81. doi: 10.4174/astr.2021.100.5.276.
5. Moro ET, Pinto PCC, Neto AJMM, Hilkner AL, Salvador LFP, da Silva BRD, et al. Quality of recovery in patients under low- or standard-pressure pneumoperitoneum. A randomised controlled trial. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2021 Oct;65(9):1240-7. doi: 10.1111/aas.13938.
6. Hoekstra LT, Ruys AT, Milstein DM, van Samkar G, van Berge Henegouwen MI, Heger M, et al. Effects of prolonged pneumoperitoneum on hepatic perfusion during laparoscopy. *Ann Surg.* 2013 Feb;257(2):302-7. doi: 10.1097/SLA.0b013e31825d5b2b.
7. Binda MM. Humidification during laparoscopic surgery: overview of the clinical benefits of using humidified gas during laparoscopic surgery. *Arch Gynecol Obstet.* 2015 Nov;292(5):955-71. doi: 10.1007/s00404-015-3717-y.
8. Albers KI, Polat F, Loonen T, Graat LJ, Mulier JP, Snoeck MM, et al. Visualising improved peritoneal perfusion at lower intra-abdominal pressure by fluorescent imaging during laparoscopic surgery: A randomised controlled study. *Int J Surg.* 2020 May;77:8-13. doi: 10.1016/j.ijssu.2020.03.019.
9. Villa G, Fiorentino M, Cappellini E, Lassola S, De Rosa S. Renal implications of pneumoperitoneum in laparoscopic surgery: mechanisms, risk factors, and preventive strategies. *Korean J Anesthesiol.* 2024 Dec;77(6):575-86. doi: 10.4097/kja.24011.
10. Dzyubanovsky IYa, Kritsak MYu, Hupalo Yu M. Features of structural reconstruction of arteries and microvascular bed of the muscular part of the diaphragm in jaundice. *Clinical and Preventive Medicine.* 2025;45(7):42-9. doi:10.31612/2616-4868.7.2025.06.
11. Крицак МЮ, Слабий ОБ, Ясіновський ОБ, Ковальчук ЛЄ. Морфологічний аналіз артерій м'язової частини діафрагми під час моделювання внутрішньочеревного тиску різної тривалості. *Art of Medicine.* 2025;35(3):33-8. doi:10.21802/artm.2025.3.35.33.
12. de Lacy FB, Taurà P, Arroyave MC, Trépanier JS, Ríos J, Bravo R, et al. Impact of pneumoperitoneum on intra-abdominal microcirculation blood flow: an experimental randomized controlled study of two insufflator models during transanal total mesorectal excision: An experimental randomized multi-arm trial with parallel treatment design. *Surg Endosc.* 2020 Oct;34(10):4494-503. doi: 10.1007/s00464-019-07236-5.
13. Luketina R, Luketina TLH, Antoniou SA, Köhler G, Könneker S, Manzenreiter L, et al. Prospective randomized controlled trial on comparison of standard CO2 pressure pneumoperitoneum insufflator versus AirSeal®. *Surg Endosc.* 2021 Jul;35(7):3670-8. doi: 10.1007/s00464-020-07846-4.
14. He H, Gruartmoner G, Ince Y, van Berge Henegouwen MI, Gisbertz SS, Geerts BF, et al. Effect of pneumoperitoneum and steep reverse-Trendelenburg position on mean systemic filling pressure, venous return, and microcirculation during esophagectomy. *J Thorac Dis.* 2018 Jun;10(6):3399-408. doi: 10.21037/jtd.2018.05.169.

15. Nickkholgh A, Barro-Bejarano M, Liang R, Zorn M, Mehrabi A, Gebhard MM, et al. Signs of reperfusion injury following CO₂ pneumoperitoneum: an in vivo microscopy study. *Surg Endosc.* 2008 Jan;22(1):122-8. doi: 10.1007/s00464-007-9386-6.

16. Zdravkovic M, Podbregar M, Kamenik M. Near-infrared spectroscopy for assessing microcirculation during laparoscopic gynaecological surgery under combined spinal-general anaesthesia or general anaesthesia alone: a randomised controlled trial. *J Clin Monit Comput.* 2020 Oct;34(5):943-53. doi: 10.1007/s10877-019-00406-9.

References

1. Haneef AK, Aljohani EA, Alzahrani RS, Alowaydhi HM, Alarif GA, Bukhari MM, et al. Active gas aspiration in reducing pain after laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Surg Endosc.* 2024 Feb;38(2):597-606. doi: 10.1007/s00464-023-10651-4.

2. Yao J, Qin S, Yang G. Comparison of the therapeutic effects of different pneumoperitoneum pressures on laparoscopic transabdominal preperitoneal hernia repair: a randomized controlled trial. *Acta Cir Bras.* 2024 Dec 6;39: e399824. doi: 10.1590/acb399824.

3. Ortenzi M, Montori G, Sartori A, Balla A, Botteri E, Piatto G, et al. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Surg Endosc.* 2022 Oct;36(10):7092-113. doi: 10.1007/s00464-022-09201-1.

4. Chang W, Yoo T, Cho WT, Cho G. Comparing postoperative pain in various pressure pneumoperitoneum of laparoscopic cholecystectomy: a double-blind randomized controlled study. *Ann Surg Treat Res.* 2021 May;100(5):276-81. doi: 10.4174/astr.2021.100.5.276.

5. Moro ET, Pinto PCC, Neto AJMM, Hilkner AL, Salvador LFP, da Silva BRD, et al. Quality of recovery in patients under low- or standard-pressure pneumoperitoneum. A randomised controlled trial. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2021 Oct;65(9):1240-7. doi: 10.1111/aas.13938.

6. Hoekstra LT, Ruys AT, Milstein DM, van Samkar G, van Berge Henegouwen MI, Heger M, et al. Effects of prolonged pneumoperitoneum on hepatic perfusion during laparoscopy. *Ann Surg.* 2013 Feb;257(2):302-7. doi: 10.1097/SLA.0b013e31825d5b2b.

7. Binda MM. Humidification during laparoscopic surgery: overview of the clinical benefits of using humidified gas during laparoscopic surgery. *Arch Gynecol Obstet.* 2015 Nov;292(5):955-71. doi: 10.1007/s00404-015-3717-y.

8. Albers KI, Polat F, Loonen T, Graat LJ, Mulier JP, Snoeck MM, et al. Visualising improved peritoneal perfusion at lower intra-abdominal pressure by fluorescent imaging during laparoscopic surgery: A randomised controlled study. *Int J Surg.* 2020 May;77:8-13. doi: 10.1016/j.ijssu.2020.03.019.

9. Villa G, Fiorentino M, Cappellini E, Lassola S, De Rosa S. Renal implications of pneumoperitoneum in laparoscopic surgery: mechanisms, risk factors, and preventive strategies. *Korean J Anesthesiol.* 2024 Dec;77(6):575-86. doi: 10.4097/kja.24011.

10. Dzyubanovsky IYa, Kritsak MYu, Hupalo Yu M. Features of structural reconstruction of arteries and microvascular bed of the muscular part of the diaphragm in jaundice. *Clinical and Preventive Medicine.* 2025;45(7):42-9. doi:10.31612/2616-4868.7.2025.06.

11. Kritsak MYU, Slaby OB, Yasinovs'kyi OB, Koval'chuk LYE. Morfolohichnyy analiz arteriy m"yazovoyi chastyny diafrahmy pid chas modelyuvannya vnutrishn'ocherevnoho tysku riznoyi tryvalosti. *Art of Medicine.* 2025;35(3):33-8. doi:10.21802/artm.2025.3.35.33. [in Ukrainian].

12. de Lacy FB, Taurà P, Arroyave MC, Trépanier JS, Ríos J, Bravo R, et al. Impact of pneumoperitoneum on intra-abdominal microcirculation blood flow: an experimental randomized controlled study of two insufflator models during transanal total mesorectal excision: An experimental randomized multi-arm trial with parallel treatment design. *Surg Endosc.* 2020 Oct;34(10):4494-503. doi: 10.1007/s00464-019-07236-5.

13. Luketina R, Luketina TLH, Antoniou SA, Köhler G, Könniker S, Manzenreiter L, et al. Prospective randomized controlled trial on comparison of standard CO₂ pressure pneumoperitoneum insufflator versus AirSeal®. *Surg Endosc.* 2021 Jul;35(7):3670-8. doi: 10.1007/s00464-020-07846-4.

14. He H, Gruartmoner G, Ince Y, van Berge Henegouwen MI, Gisbertz SS, Geerts BF, et al. Effect of pneumoperitoneum and steep reverse-Trendelenburg position on mean systemic filling pressure, venous return, and microcirculation during esophagectomy. *J Thorac Dis.* 2018 Jun;10(6):3399-408. doi: 10.21037/jtd.2018.05.169.

15. Nickkholgh A, Barro-Bejarano M, Liang R, Zorn M, Mehrabi A, Gebhard MM, et al. Signs of reperfusion injury following CO₂ pneumoperitoneum: an in vivo microscopy study. *Surg Endosc.* 2008 Jan;22(1):122-8. doi: 10.1007/s00464-007-9386-6.

16. Zdravkovic M, Podbregar M, Kamenik M. Near-infrared spectroscopy for assessing microcirculation during laparoscopic gynaecological surgery under combined spinal-general anaesthesia or general anaesthesia alone: a randomised controlled trial. *J Clin Monit Comput.* 2020 Oct;34(5):943-53. doi: 10.1007/s10877-019-00406-9.

DYNAMICS OF CHANGES IN THE HEMOMICROCIRCULATORY PATHWAY OF THE DIAPHRAGM WHEN USING STANDARD PRESSURE PNEUMOPERITONEUM

Abstract. The creation of standard pressure pneumoperitoneum leads to a cranial displacement of the diaphragm dome, which changes its architectonics and causes stretching of muscle fibers. However, the most vulnerable link in this system is the hemomicrocirculatory pathway, the condition of which determines the viability of the tissue and its ability to recover in the postoperative period.

The aim of the work was to conduct a morphometric assessment of the parameters of the hemomicrocirculatory pathway of the costal and lumbar parts of the diaphragm when using standard pressure pneumoperitoneum in dynamics.

The experimental study was performed on 55 animals, which were divided into 4 groups. Group I is the control group, which was not simulated with any pathology. The first, second and third experimental groups, where pneumoperitoneum of standard pressure was simulated for 1, 2 and 3 hours, respectively. After which the diaphragm was removed and morphometric indicators were studied. As a result of the analysis of morphometric parameters, it was found that after five hours of the created experimental conditions, the diameter of arterioles decreased by 15.7% and 16.5%, the diameter of precapillary arterioles by 15.5% and 10.5%, the diameter of hemocapillary by 17.2% and 21.8% in the costal and lumbar parts, respectively. At this time, the diameter of postcapillary venules increased by 21.1% and 22.7%, the diameter of venules by 17.1% and 17.6%, respectively, in the costal and lumbar parts. The density of the capillary bed decreases in the costal part by 12.9% and in the lumbar part by 12.8%. The data indicate a key pathogenetic mechanism that determines the development of tissue ischemia and venous congestion.

Pneumoperitoneum of standard pressure leads to pronounced morphometric parameters of the hemomicrocirculatory bed, which are characterized by narrowing of the afferent link and expansion of the efferent link of the microvessels of the costal and lumbar parts of the diaphragm.

Key words: pneumoperitoneum, standard pressure, diaphragm, morphometry, experiment, rats.

Відомості про автора:

Кріцак Мирослав Юрійович – кандидат медичних наук, доцент кафедри хірургії факультету післядипломної освіти Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, м. Тернопіль, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1020-3584>.

Information about the author:

Kritsak Myroslav Yu. – PhD, Associate Professor of the Surgery, Faculty of Postgraduate Education Department of the I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1020-3584>.

Надійшла 14.11.2025 р.