

УДК 611.6:612.76:611.018.2:611.61:611.631:611.64

[https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-3\(37\)-1282-1293](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-3(37)-1282-1293)

Квятковський Євген Аркадійович кандидат медичних наук, лікар-уролог, КНП «Міська клінічна лікарня № 6» ДМР, вул. Батумська, 13, м. Дніпро, 49000, тел.: (097) 692-63-32, <https://orcid.org/0000-0002-3973-6854>

Квятковська Тетяна Олександрівна доктор медичних наук, професор, кафедра анатомії людини, клінічної анатомії та оперативної хірургії, Дніпровський державний медичний університет, вул. В. Вернадського, 9, м. Дніпро, 49044, тел.: (056) 766-48-48, <https://orcid.org/0000-0001-8206-6203>

БІОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КАПСУЛ СЕЧОСТАТЕВИХ ОРГАНІВ ЛЮДИНИ: ФІБРОЗНОЇ КАПСУЛИ НИРКИ, БІЛКОВОЇ ОБОЛОНКИ ЯЄЧКА ТА КАВЕРНОЗНОГО ТІЛА СТАТЕВОГО ЧЛЕНА

Анотація. Біомеханічні властивості капсул сечостатевих органів важливі для розуміння спонтанних і травматичних розривів органів та капсулотомій. Мета роботи: з'ясування біомеханічних властивостей фіброзної капсули нирки, білкової оболонки яєчка та кавернозного тіла статевого члена фізично нормальних чоловіків. Дослідження проведені на зразках фіброзної капсули нирки 30 трупів чоловіків віком 16-60 років та білкової оболонки яєчка і кавернозного тіла 8 трупів чоловіків віком 31-40 років, які загинули внаслідок нещасних випадків, на машині для випробування міцності FP-10 (Німеччина). Визначали силу, що викликає розрив (P_r), модуль пружності (E_σ) та релаксацію напружень (σ), що у вигляді кривої описує зменшення існуючої напруги при постійно діючій деформації. Сила, що викликає розрив, була найбільшою для поздовжніх передніх/задніх і бічних зразків фіброзної капсули нирки у віці 16-20 років ($14,8 \pm 2,0$ Н і $14,6 \pm 2,1$ Н відповідно), а найменшою – для полярних і поперечних зразків у віці 51-60 років ($6,9 \pm 0,6$ Н і $7,2 \pm 0,9$ відповідно). Достовірне зменшення сили, що викликає розрив, спостерігалось вже у віці 31-50 років. Модуль пружності коливався від $34,1 \pm 3,6$ МПа до $26,9 \pm 2,2$ МПа і був найнижчим у полярних ділянках фіброзної капсули та у віковій групі 51-60 років. Полярні і поперечні зразки фіброзної капсули з серединою на бічному краї нирки були менш міцними, ніж поздовжні бічні та передні/задні. Отримані дані свідчать про концентрацію напруги в полярних ділянках та уздовж бічного краю нирки і пояснюють частіші розриви трансплантатів нирки в цих відділах. За логарифмічною кривою релаксації внутрішнє напруження прогнозовано через 10 діб склало 36% від первинного. Це необхідно враховувати при набряку трансплантата

нирки та вчасно виконувати капсулотомію. Сила, що викликає розрив, поздовжніх зразків білкової оболонки бічної поверхні яєчка становила $44,48 \pm 1,84$ Н, присередньої поверхні – $22,73 \pm 0,73$ Н, поперечних екваторіальних зразків – $53,39 \pm 1,81$ Н. Модуль пружності поздовжніх зразків бічної поверхні яєчка склав $23,18 \pm 2,35$ МПа, присередньої поверхні – $18,02 \pm 0,44$ МПа, екваторіальних зразків – $31,52 \pm 0,74$ МПа. На відміну від фіброзної капсули нирки, поперечні зразки білкової оболонки яєчка, що проходять через його передній край, виявилися міцнішими, ніж поздовжні бічні і присередні. Релаксація внутрішнього напруження білкової оболонки яєчка прогнозовано через 3 доби складає 26% від початкових значень і тримається майже на одному рівні надалі. При гострому орхоепідидиміті для запобігання розриву яєчка необхідно вчасно змінювати тактику лікування на оперативну, орієнтуючись на стан яєчка протягом перших трьох діб. Модуль пружності і сила, що викликає розрив, білкової оболонки кавернозних тіл перевищує такі білкової оболонки яєчка і фіброзної капсули нирки.

Ключові слова: фіброзна капсула нирки, яєчко, кавернозне тіло статевого члена, білкова оболонка, біомеханіка, модуль пружності, сила, що викликає розрив, релаксація напруги.

Kvyatkovskiy Evgeny Arkadiyovich Candidate of medical sciences, urologist, CNP "City Clinical Hospital No. 6" DMR, Batumska St., 13, Dnipro, 49000, tel.: (097) 692-63-32, <https://orcid.org/0000-0002-3973-6854>

Kvyatkovska Tetyana Oleksandrivna Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Human Anatomy, Clinical Anatomy and Operative Surgery, Dnipro State Medical University, V. Vernadskiy St., 9, Dnipro, 49044, tel.: (056) 766-48-48, <https://orcid.org/0000-0001-8206-6203>

BIOMECHANICAL PROPERTIES OF CAPSULES OF HUMAN GENITOURINARY ORGANS: THE KIDNEY FIBROUS CAPSULE, THE TUNICA ALBUGINEA TESTIS AND CORPUS CAVERNOSUM PENIS

Abstract. The biomechanical properties of genitourinary organ capsules are important for understanding spontaneous and traumatic organ ruptures and capsulotomy. Purpose of the work: to establish the biomechanical properties of the kidney fibrous capsule, the tunica albuginea testis and corpus cavernosum penis in physically normal men. The studies were carried out on samples of the kidney fibrous capsule of 30 cadavers of men aged 16-60 years and the tunica albuginea of testis and corpus cavernosum of 8 cadavers of men aged 31-40 years who died as a result of accidents, using a strength testing machine FP-1 (Germany). The breaking force (P_p), elastic modulus ($E\sigma$) and stress relaxation (σ) were determined, which in

the form of a curve describes the decrease in existing stress under constant deformation. The breaking force was greatest for longitudinal, anterior/posterior and lateral specimens of the kidney fibrous capsule at the age of 16-20 years (14.8 ± 2.0 N and 14.6 ± 2.1 N, respectively), and the smallest for polar and transverse specimens aged 51-60 years (6.9 ± 0.6 N and 7.2 ± 0.9 , respectively). A significant decrease of the breaking force was observed already at the age of 31-50 years. The elastic modulus ranged from 34.1 ± 3.6 MPa to 26.9 ± 2.2 MPa and was lowest in the polar areas of the fibrous capsule and at the age group of 51-60 years. Polar and transverse specimens of the fibrous capsule with a middle at the lateral edge of the kidney were less strong than longitudinal lateral and anterior/posterior ones. The data obtained indicate stress concentration in the polar regions and along the lateral edge of the kidney and explain the more frequent ruptures of kidney grafts in these regions. According to the logarithmic relaxation curve, the internal stress was predicted to be 36% of the initial value after 10 days. This must be taken into account when there is swelling of the kidney graft and perform capsulotomy in time. The longitudinal specimens breaking force of the tunica albuginea of the testis lateral surface was 44.48 ± 1.84 N, medial surface – 22.73 ± 0.73 N, transverse equatorial specimens – 53.39 ± 1.81 N. Modulus elasticity of the longitudinal specimens of the testis lateral surface was 23.18 ± 2.35 MPa, medial surface – 18.02 ± 0.44 MPa, equatorial samples – 31.52 ± 0.74 MPa. In contrast to the kidney fibrous capsule, the transverse specimens of the tunica albuginea testis passing through its anterior edge turned out to be stronger than the longitudinal lateral and medial ones. The relaxation of the internal tension of the tunica albuginea testis is predicted to be 26% of the initial values after 3 days and remains almost at the same level in the future. In case of acute orchiepididymitis, to prevent testicular rupture, it is necessary to promptly change the treatment tactics to surgery, focusing on the condition of the testicle during the first three days. The elastic modulus and breaking force of the tunica albuginea corpora cavernosa exceed those of the tunica albuginea testis and the kidney fibrous capsule.

Keywords: kidney fibrous capsule, tunica albuginea, testis, corpus cavernosum penis, biomechanics, elastic modulus, breaking force, stress relaxation.

Постановка проблеми. Пошкодження капсул сечостатевих органів може бути спричинене підвищенням внутрішньоорганної напруги або мати травматичний характер. Підвищення внутрішньоорганного тиску частіше пов'язане з запальними процесами та гострим відторгненням трансплантованої нирки, що може призвести до спонтанного розриву органів. Серед усіх травм частота урогенітальних травм сягає 10-20%, при цьому нирка вражається в 65-90% випадків [1]. Травма яєчка становить біля 1% всіх ушкоджень, найчастіше це колоті і вогнепальні поранення, а також тупі ушкодження, отримані під час дорожньо-транспортних пригод або спортивних змагань [2]. У структурі бойових травм в нашій країні на 2021 рік ураження органів сечостатевої

системи складала 3,5% [3]. Тяжкість поранення посилюється через потужність контузійно-комоційного механізму дії сучасної високоенергетичної мінно-вибухової зброї. Суттєва роль у їхньому механізмі належить капсулам органів. Тому біомеханічні дослідження фіброзної капсули нирки, білкової оболонки яєчка і кавернозного тіла, які мають формоутворюючу і регулюючу внутрішнє напруження функції, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фіброзна капсула нирки складається з колагенових, еластичних і ретикулярних волокон, кількість і взаємодія яких обумовлює її деформаційні і механічні властивості. Спонтанний розрив ниркового алотрансплантата є рідкісним, але потенційно небезпечним для життя ускладненням трансплантації нирки [4, 5]. При різній ролі кожного елемента сполучнотканинного каркаса нирки в підтримці тканинного тиску найбільш виражені механічні властивості притаманні фіброзній капсулі, на яку приходить 70% усього навантаження. З'ясовано, що декапсуляція запобігає виникненню внутрішнього ниркового компартмент-синдрому після гострого ішемічного ураження нирок, а декапсульовані нирки продемонстрували ефективно зниження внутрішньониркового тиску [6]. З огляду на те, що ішемічно-реперфузійне ураження донорських нирок може погіршити результат трансплантації, в експериментах на нирках свиней з'ясовано, що реноваскулярну перфузію можна покращити за допомогою капсулотомії [7]. Капсулотомію виконують і при субкапсулярних гематомах трансплантованої нирки, нирці Пейджа [8]. Утворення субкапсулярної гематоми може бути наслідком зовнішньої або внутрішньої травми, а також виникати спонтанно. Феномен Пейджа – це стан нирок, що характеризується зовнішнім стисненням нирки, як правило, субкапсулярною гематомою, що призводить до стійкої вторинної гіпертензії внаслідок гіпоперфузії та ішемії і часто потребує капсулотомії або капсулоектомії [9]. Вивчення механічних властивостей фіброзної капсули нирки свині при деформаціях, пов'язаних із тупою травмою живота, показало, що напруження розриву ниркової капсули свині при одноразовому ударі значно зростала зі збільшенням швидкості деформації, модуль пружності зростав від 25 МПа до 100 МПа [10]. Стійкість різних відділів фіброзної капсули нирки до напруження розриву і концентрація напружень вивчені недостатньо.

Білкова оболонка яєчка і кавернозного тіла, будучи композитним матеріалом, до складу якого входять колагенові та еластичні волокна, кількість і спосіб взаємодії яких визначає співвідношення характеристик міцності та деформаційних властивостей, служить своєрідним каркасом органів та корелює з рівнем внутрішньоорганного тиску. Розрив білкової оболонки яєчка спостерігається при орхоепідидимітах [11], а також при травмах, зокрема, в 50% випадків – прямої тупої травми мошонки [12]. Вважають, що для розриву яєчка необхідна пряма сила в 50 кг [13]. Даних про біомеханічні властивості білкової оболонки яєчка вкрай мало.

Функціональна і структурна цілісність статевого члена має важливе значення для сексуального та репродуктивного здоров'я. Численні умови можуть загрожувати еректильній здатності: еректильна дисфункція, хвороба Пейроні, наслідки радикальної простатектомії, травми та інше. [14]. Хірургічна імплантація надувного протеза статевого члена залишається стандартом лікування тяжкої еректильної дисфункції, а ідеальна хірургічна техніка вимагає глибокого розуміння відповідної анатомії і біомеханічних властивостей [15]. Випробування на розтяг білкової оболонки кавернозного тіла свині виявили, що модуль пружності Юнга був вищим поздовжньо, ніж за колом (60 ± 18 МПа проти 8 ± 5 МПа) [16]. Дані про модуль пружності білкової оболонки кавернозного тіла людини різняться: при одновісному розриві тканини через 12-24 годин від смерті – близько 100 МПа, [17], у пацієнтів, які проходили лікування пенектомією, модуль пружності Юнга склав 8,1 МПа проти 34,0 МПа у здорових бабуїнів [18]. Розривне напруження білкової оболонки кавернозного тіла людини коливалося від 16 МПа до 45 МПа [19]. Останнім часом з'явилися дослідження з ультразвукової еластографії кавернозних тіл [20]. Разом з тим, вважають, що даних про біомеханічні властивості нативних препаратів білкової оболонки в сучасній літературі бракує, хоча білкова оболонка є основною несучою тканиною під час ерекції і її біомеханічні властивості мають вирішальне значення розуміння фізіології статевого члена та розширення кавернозних тіл. Під час лікуванні хвороби Пейроні після ін'єкцій лікарських речовин безпосередньо в бляшку білкової оболонки кавернозного тіла кілька тижнів проводять механічне розтягування статевого члена, при якому необхідно враховувати його біомеханічні властивості [21, 22]. При створенні ендотелізованих фібробластних трубок з метою реконструкції білкової оболонки кавернозного тіла теж необхідна їх біомеханічна оцінка [14]. Тому дані про пружність і міцність білкової оболонки на розрив є корисною інформацією.

Мета статті – з'ясування біомеханічних властивостей фіброзної капсули нирки, білкової оболонки яєчка та кавернозного тіла статевого члена фізично нормальних чоловіків.

Виклад основного матеріалу. Матеріали та методи. Дослідження проведені на автопсійних зразках фіброзної капсули нирки 30 трупів чоловіків віком 16-60 років та білкової оболонки яєчка і кавернозного тіла 8 трупів чоловіків віком 31-40 років, які загинули внаслідок нещасних випадків. Макроскопічних змін досліджуваних органів при заборі тканин зазначено не було. Зразки фіброзної капсули нирки розміром $1,5 \times 5$ см (полярні верхній/нижній, поздовжні передній/задній, поздовжній бічний, поперечний бічний, розташований екваторіально з серединою на бічному краї нирки), білкової оболонки яєчка розміром $1,5 \times 0,5$ см (поздовжні присередній і бічний та поперечний екваторіальний з серединою на передньому краї яєчка), а також зразки білкової оболонки кавернозного тіла статевого члена розміром $1,5 \times 0,5$

см (поздовжні бічні) отримували за допомогою штанцевого ножа і поміщали у фізіологічний розчин. Дослідження проводили в день забору матеріалу на машині для випробування міцності FP-10 (Німеччина). Товщину зразків вимірювали мікрометром. Вологий зразок закріплювали у затискному пристосуванні. Отриманий на діаграмі запис розриву зразка розшифровували. Визначали силу, що викликає розрив (P_r), модуль пружності ($E\sigma$) та релаксацію напружень (σ), що у вигляді кривої описує зменшення існуючої напруги при постійно діючій деформації. Статистичну обробку даних виконували у програмі Excel, для порівняння статистичних даних використовували критерій Стьюдента.

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідження біомеханічних властивостей фіброзної капсули нирки в залежності від віку продемонстрували, що її механічні показники зменшувалися з віком у всіх відділах ниркової капсули (табл. 1).

Таблиця 1

Біомеханічні властивості фіброзної капсули нирки людини

Зразки фіброзної капсули нирки	Віковий період, роки	Сила, що викликає розрив (P_r), Н	Модуль пружності ($E\sigma$), МПа	Відносне подовження (ξ_r), %
Передні/задні поздовжні	16-20	14,6±2,1	33,8±0,8	27,3±1,4
	31-50	11,6±0,8*	33,5±1,4	23,4±0,7
	51-60	7,9±0,6*	30,3±1,9	22,7±0,8
Бічні поздовжні	16-20	14,8±2,0	34,1±3,6	28,9±2,7
	31-50	10,5±1,0*	33,6±3,1	24,4±1,5
	51-60	9,0±1,0*	31,5±3,3	23,2±0,8
Бічні поперечні	16-20	11,3±0,9	32,2±2,5	31,7±2,0
	31-50	9,4±0,8*	32,5±2,2	23,6±1,1
	51-60	7,2±0,9*	32,0±4,2	21,8±1,0*
Верхні/нижні полярні	16-20	9,5±0,6	32,1±2,0	31,9±1,2
	31-50	7,0±0,4*	31,9±1,6	23,7±1,0*
	51-60	6,9±0,6*	26,9±2,2	22,6±0,9*

Примітка: * - вірогідність різниці при $p < 0,5$ з віковим періодом 16-20 років за критерієм Стьюдента.

Найменші вікові зміни стосувалися модуля пружності, втім необхідно відзначити, що найменше його значення було в полярних зразках у віковій групі 51-60 років. Сила, що викликає розрив, у зразках фіброзної капсули

нирки всіх локалізацій суттєво зменшувалася вже у віці 31-50 років і була достовірно меншою у вікових групах 31-50 років і 51-60 років порівняно з віковою групою 16-20 років та найменшою у віковій групі 51-60 років.

Відносне подовження зразків фіброзної капсули нирки всіх локалізацій у вікових групах 31-50 років і 51-60 років було меншим, ніж у віковій групі 16-20 років. Відносне подовження бічних поперечних і полярних зразків достовірно зменшувалося у віковій групі 51-60 років порівняно з групою 16-20 років. У віці 31-50 років і 51-60 років спостерігалася приблизна рівність відносного подовження різних ділянок фіброзної капсули нирки. Загалом фіброзна капсула нирки була розтяжна у межах 21,8%-31,9%.

За біомеханічними показниками найбільше змінювалися з віком полярні зразки фіброзної капсули нирки та в дещо меншій мірі бічні поперечні зразки.

Порівняння біомеханічних властивостей зразків фіброзної капсули нирки різної локалізації показало наступне. Сила, що викликає розрив, полярних зразків у всіх вікових групах була меншою порівняно з передніми/задніми та бічними поздовжніми зразками, у вікових групах 31-50 років і 51-60 років ця різниця була достовірною ($p < 0,5$). Натомість, сила, що викликає розрив, передніх/задніх і бічних поздовжніх зразків була близькою за значеннями. Сила, що викликає розрив, поперечних бічних зразків була меншою, ніж поздовжніх бічних і передніх/задніх зразків. Необхідно зауважити, що у ділянці бічного краю нирки фіброзна капсула у поперечному напрямку була менш міцною, ніж у поздовжньому, а у поздовжньому напрямку за міцністю наближалася до передніх і задніх ділянок. Отримані дані свідчать про концентрацію напруги в полярних ділянках та уздовж бічного краю нирки і пояснюють частіші розриви трансплантатів нирки саме в цих відділах [4]. Фіброзна капсула нирки при підвищеному внутрішньоорганному тиску розривається переважно уздовж зовнішнього краю, а не в поперечному, зокрема, екваторіальному напрямку.

Модуль пружності був найнижчим також у полярних ділянках фіброзної капсули, але різниця не була статистично достовірною. У віковій групі 16-20 років полярні та бічні поперечні зразки характеризувалися більшим відносним подовженням порівняно зі зразками інших локалізацій.

Результати вище наведених досліджень характеризують важливу роль фіброзної капсули, яка впливає на концентрацію напружень при підвищенні внутрішньониркового тиску, у функціонуванні та ауторегуляції нирки.

Дослідження змін внутрішнього напруження (σ) зразків фіброзної капсули нирки, закріплених в затискному пристосуванні, продемонструвало її релаксацію (розслаблення). Протягом 1 хвилини внутрішнє напруження склало від первинного в середньому 80%, через 10 хвилин – 60%, через 60 хвилин біля половини – 56%, а за характером логарифмічної кривої релаксації прогнозовано через 10 діб – 36%. Отже, внутрішнє напруження фіброзної капсули нирки, незважаючи на інтенсивну релаксацію, залишається досить

високим у віддалені строки, внаслідок чого капсула продовжує тиснути на паренхіму збільшеного в об'ємі органа. Це необхідно враховувати при набряку трансплантата нирки та вчасно виконувати капсулотомію.

Дослідження біомеханічних властивостей білкової оболонки яєчка також дозволило встановити відмінність міцності різних її ділянок. Сила, що викликає розрив, поздовжніх зразків білкової оболонки бічної поверхні яєчка становила $44,48 \pm 1,84$ Н, присередньої – $22,73 \pm 0,73$ Н, поперечних екваторіальних зразків – $53,39 \pm 1,81$ Н. Модуль пружності поздовжніх зразків бічної поверхні яєчка склав $23,18 \pm 2,35$ МПа, присередньої – $18,02 \pm 0,44$ МПа, екваторіальних зразків – $31,52 \pm 0,74$ МПа. Переважання значень показників міцності поперечних зразків білкової оболонки яєчка над поздовжніми ($p < 0,05$), поздовжніх бічних зразків над значеннями поздовжніх присередніх ($p < 0,05$) пов'язано з певною спрямованістю волокон еласто-колагенового каркасу білкової оболонки, його щільністю і відображає здебільшого поперечний хід колагенових волокон та превалювання поперечних навантажень. На відміну від фіброзної капсули нирки, поперечні зразки білкової оболонки яєчка, що проходять через його передній край, виявилися міцнішими, ніж поздовжні бічні і присередні зразки. Це, зокрема, пояснює спостереження про локалізацію спонтанних розривів яєчка збоку [23]. З огляду на дані дослідження біомеханічних властивостей поздовжніх і поперечних зразків білкової оболонки яєчка логічно припустити, що при підвищенні тиску в яєчку воно повинне більшою мірою збільшуватися в довжину, ніж у ширину. Цьому є підтвердження за результатами ультразвукових досліджень (УЗД) форми яєчок, уражених паротитним орхітом [24]. При первинному УЗД усі 9 обстежених яєчок, були еліптичними, проте під час хвороби при контрольному УЗД форма яєчок змінилася на довгасту у 7 з них. Форму яєчка вважали довгастою, якщо довжина яєчка більше, ніж вдвічі, перевищувала ширину.

Щохвилине дослідження змін внутрішнього напруження зразків білкової оболонки яєчка протягом 1 години, дозволило встановити, що через 1 годину воно в середньому склало 41% від початкового, а за характером логарифмічної кривої релаксації прогнозовано через 6 годин воно повинно було скласти 34% від початкового, через 12 годин – 32%, через 1 добу – 29%, через 3 доби – 26%, через 6 діб – 24%, через 12 діб – 23%. Таким чином, при напруженні білкової оболонки яєчка з часом відбувається її релаксація, яка повільніша, ніж фіброзної капсули нирки. На підставі отриманих даних можна припустити, що зі збільшенням об'єму яєчка в його білковій оболонці виникають внутрішні напруження, які з часом релаксують, але через 3 доби все ще складають біля чверті від початкових і тримаються майже на одному рівні надалі. Тому при гострому орхоепідидиміті для запобігання розриву яєчка необхідно вчасно змінювати тактику лікування на оперативну, орієнтуючись на стан яєчка протягом перших трьох діб.

Вивчення біомеханічних властивостей бічних поздовжніх зразків білкової оболонки кавернозного тіла людини показало, що модуль пружності склав $72,4 \pm 8,3$ МПа, сила, що викликає розрив, – $45,2 \pm 3,1$ Н. Це підтверджує, що білкова оболонка яєчка є однією з найміцніших оболонок в тілі людини [18]. Протягом 1 хвилини внутрішнє напруження склало від первинного в середньому 55% і таким же залишалося протягом 5 хвилин. Результати цього дослідження можуть бути використані при визначенні якостей фаллопротезів, які імплантують в кавернозні тіла статевого члена, для більшої відповідності властивостям білкової оболонки кавернозного тіла.

Висновки.

1. Міцність фіброзної капсули нирки за основними біомеханічними показниками з віком зменшується. Сила, що викликає розрив, зразків фіброзної капсули нирки усіх локалізацій достовірно менша у вікових групах 31-50 років і 51-60 років порівняно з віковою групою 16-20 років та найменша у віковій групі 51-60 років. Менше з віком змінюється модуль пружності і відносне подовження.

2. Найбільш міцними є поздовжні зразки фіброзної капсули нирки на її передній, задній поверхні та бічному краї. Меншу міцність мають бічні поперечні зразки з серединою відповідно бічному краю нирки, найменшу міцність – зразки полярних ділянок. Сила, що викликає розрив, полярних зразків у вікових групах 31-50 років і 51-60 років достовірно менша порівняно з поздовжніми передніми/задніми та поздовжніми бічними зразками. Це пояснює частіші спонтанні розриви трансплантатів нирки в полярних ділянках та по її зовнішньому краю, де спостерігається концентрація напружень.

3. За кривою релаксації внутрішнє напруження фіброзної капсули прогнозовано залишається досить високим у віддалені строки збільшення об'єму нирки – через 10 діб складає $1/3$ від попереднього, внаслідок чого капсула продовжує тиснути на паренхіму. Це необхідно враховувати при набряку трансплантата нирки і вчасно виконувати капсулотомію.

4. Найбільш міцними є поперечні зразки білкової оболонки яєчка, що проходять через його передній край, далі за зменшенням міцності ідуть поздовжні бічні та поздовжні присередні зразки. Це пояснює первинне збільшення яєчка в довжину при збільшенні його об'єму внаслідок запального процесу та можливість спонтанних розривів збоку.

5. Релаксація внутрішнього напруження білкової оболонки яєчка прогнозовано через 3 доби складає біля чверті від початкових значень і тримається майже на одному рівні надалі. При гострому орхоепідидиміті для запобігання розриву яєчка необхідно вчасно змінювати тактику лікування на оперативну, орієнтуючись на стан яєчка протягом перших трьох діб.

6. Модуль пружності і сила, що викликає розрив, білкової оболонки кавернозних тіл перевищує такі білкової оболонки яєчка і фіброзної капсули нирки.

Література:

1. Coccolini F., Moore E. E., Kluger Y., Biffl W., Leppaniemi A., Matsumura Y., Kim F., Peitzman A.B., Fraga G.P., Sartelli M. et al. Kidney and uro-trauma: WSES-AAST guidelines. *World J. Emerg. Surg.* 2019. 2(14): 54.
2. Yokokawa S., Tabei T., Kobayashi K. Testicular rupture successfully treated with a tunica vaginalis flap. *IJU Case Rep.* 2021. 4:82-85.
3. Головка С.В. Сучасна бойова травма органів сечостатевої системи. *Здоров'я України. Урологія. Нефрологія. Андрологія. Тематичний номер.* 2021. 2(23): 29-30.
4. Ray D.S., Thukral S. Spontaneous renal allograft rupture caused by acute tubular necrosis: a case report and review of the literature. *Case Rep. Transplant.* 2017: 9158237.
5. Umar maqbool, Asuri krishna, Bansal V.K., Om prakash, Subodh Kumar. Spontaneous renal allograft rupture of unknown etiology: a case report. 2022. *Int. J. Adv. Res.* 6(10), 798-803.
6. Cruces P., Lillo P., Salas C., Salomon T., Lillo F., González C., Pacheco A., Hurtado D.E. Renal decapsulation prevents intrinsic renal compartment syndrome in ischemia-reperfusion-induced acute kidney injury: A physiologic approach. *Crit. Care Med.* 2018. 46(2): 216-222.
7. van Smaalen T.C., Mestrom M.G.A.M., Cox J.H.F.M.; Winkens B., van Heurn L.W.E. Capsulotomy of ischemically damaged donor kidneys: A pig study subject area surgery. *Eur. Surg. Res.* 2016. 57(1-2): 89-99.
8. Lee T.W., Bae W., Choi J., Bae E., Jang H.N., Chang Se-Ho, Park D.J. Page kidney following spontaneous subcapsular hematoma immediately after kidney transplantation: a case report. *BMC Nephrol.* 2022. 23(1):239.
9. Zaw E., Bies J.J., Zay H., Masseur E., Hassan M., Prakash S., Htay Th., Lane M. A rare case of page kidney with superimposed infection. *Cureus.* 2023. 15(12): e50842.
10. Snedeker J.G., Niederer P., Schmidlin F.R., Farshad M., Demetropoulos C.K., Lee J.B., Yang K.H. Strain-rate dependent material properties of the porcine and human kidney capsule. *J. Biomech.* 2005. 38(5):1011-1021.
11. Brown C.T., Wan J.C., DaJustaa D.G. Non-traumatic testicular rupture following episode of epididymo-orchitis. *Urol. Case Rep.* 2018. 17: 48-49.
12. Ryan P Terlecki, Testicular trauma. *Medscape.* Jun.20.2023.
13. Essien F., Eagle Z., J. Tate, Barber A. Testicular rupture: the other nutcracker syndrome. *Clinical Medicine Insights: Case Reports.* 2022. 15: 1-3.
14. Terlecki R.P., Boes E. Novel therapeutics for male sexual pathology: cellular and tissue-based strategies targeting form and function. *Scientific Advances in Reconstructive Urology and Tissue Engineering.* 2022, 10: 227-241.
15. Osmonov D., Wilson S.K., Heinze T., Heimke M., Novak J., Ragheb A., Köhler T., Hatzichristodoulou G., Wedel T. Anatomic considerations of inflatable penile prosthetics: lessons gleaned from surgical body donor workshops. *Int. J. Impot. Res.* 2023. 35(7):672-678.
16. Bielajew B.J., Nordberg R.C., Hu J.C., Athanasiou K.A., Eleswarapu S.V. Tissue anisotropy and collagenomics in porcine penile tunica albuginea: Implications for penile structure-function relationships and tissue engineering. *Acta Biomaterialia.* 2023. 169(1): 130-137.
17. Hou S. Quantification of the Elastic and Relaxation Properties of Human Tunica Albuginea under Biaxial Loading. 2019. Blacksburg, Virginia.
18. Kandabarow A.M., Chuang E., McKenna K., Le B., McVary K., Colombo A. Tensile strength of penile tunica albuginea in a human model. *J. Urol.* 2022. 207(5S): MP38-10.
19. Hsu G.L., Brock G., Martínez-Piñeiro L., von Heyden B., Lue T.F., Tanagho E.A. Anatomy and strength of the tunica albuginea: its relevance to penile prosthesis extrusion. *J. Urol.* 1994. 151(5):1205-1208.
20. Динник О.Б. Мірошніков Я.О., Наталенко І.Л., Керусь С.В., Караєв Т.В. Еластографія статевого члена. *Радіологічний вісник.* 2017. 3-4: 50-51.

21. Haney N.M., Kohn T.P., Nichols P.E., Hellstrom W.J.G. The effect of adjunct mechanical traction on penile length in men undergoing primary treatment for Peyronie's disease: a systematic review and meta-analysis. *Urology*. 2018. 122: 110-115.

22. Amighi A., Mills S.A., Eleswarapu S.V., Regets K.V., Mendhiratta N., Mills J.N. A modified technique for intralesional injection of collagenase *Clostridium histolyticum* for Peyronie's disease results in reduced procedural morbidity using a standardized hematoma classification rubric. *World J. Urol.* 2020. 38: 293-298.

23. Brown C.T., Wan J.C., DaJustaa D.G. Non-traumatic testicular rupture following episode of epididymo-orchitis. *Urol. Case Rep.* 2018. 17:48-49.

24. Choi Hyeon-II, Yang Dal Mo, Kim Hyun Cheol, Kim Sang Won, Jeong Hyun Seok, Moon Sung Kyung, Lim Joo Won. Testicular atrophy after mumps orchitis: ultrasonographic findings. *Korean Society of Ultrasound in Medicine*. 2020. 10.14366/usg.19097. USG 2288-5919, 2288-5943.

References:

1. Coccolini F., Moore E. E., Kluger Y., Biffi W., Leppaniemi A., Matsumura Y., Kim F., Peitzman A.B., Fraga G.P., Sartelli M. et al. Kidney and uro-trauma: WSES-AAST guidelines. *World J. Emerg. Surg.* 2019. 2(14): 54.

2. Yokokawa S., Tabei T., Kobayashi K. Testicular rupture successfully treated with a tunica vaginalis flap. *IJU Case Rep.* 2021. 4:82-85.

3. Holovko S.V. Suchasna boyova travma orhaniv sechovoyi systemy. *Zdorov'ya Ukrainy. Urolohiya. Nefrolohiya. Androlohiya. Tematychnyy nomer.* 2021. 2(23): 29-30. [in Ukrainian]

4. Ray D.S., Thukral S. Spontaneous renal allograft rupture caused by acute tubular necrosis: a case report and review of the literature. *Case Rep. Transplant.* 2017: 9158237.

5. Umar maqbool, Asuri krishna, Bansal V.K., Om prakash, Subodh Kumar. Spontaneous renal allograft rupture of unknown etiology: a case report. 2022. *Int. J. Adv. Res.* 6(10), 798-803.

6. Cruces P., Lillo P., Salas C., Salomon T., Lillo F., González C., Pacheco A., Hurtado D.E. Renal decapsulation prevents intrinsic renal compartment syndrome in ischemia-reperfusion-induced acute kidney injury: A physiologic approach. *Crit. Care Med.* 2018. 46(2): 216-222.

7. van Smaalen T.C., Mestrom M.G.A.M., Kox J.H.F.M.; Winkens B., van Heurn L.W.E. Capsulotomy of ischemically damaged donor kidneys: A pig study subject area surgery. *Eur. Surg. Res.* 2016. 57(1-2): 89-99.

8. Lee T.W., Bae W., Choi J., Bae E., Jang H.N., Chang Se-Ho, Park D.J. Page kidney following spontaneous subcapsular hematoma immediately after kidney transplantation: a case report. *BMC Nephrol.* 2022. 23(1):239.

9. Zaw E., Bies J.J., Zay H., Massebo E., Hassan M., Prakash S., Htay Th., Lane M. A rare case of page kidney with superimposed infection. 2023. *Cureus* 15(12): e50842.

10. Snedeker J.G., Niederer P., Schmidlin F.R., Farshad M., Demetropoulos C.K., Lee J.B., Yang K.H. Strain-rate dependent material properties of the porcine and human kidney capsule. *J. Biomech.* 2005. 38(5):1011-1021.

11. Brown C.T., Wan J.C., DaJustaa D.G. Non-traumatic testicular rupture following episode of epididymo-orchitis. *Urol Case Rep.* 2018. 17: 48-49.

12. Ryan P Terlecki, Testicular trauma. *Medscape.* Jun.20.2023.

13. Essien F., Eagle Z., J. Tate, Barber A. Testicular rupture: the other nutcracker syndrome. *Clinical Medicine Insights: Case Reports.* 2022. 15: 1-3.

14. Terlecki R.P., Boes E. Novel therapeutics for male sexual pathology: cellular and tissue-based strategies targeting form and function. *Scientific Advances in Reconstructive Urology and Tissue Engineering.* 2022, 10: 227-241.

15. Osmonov D., Wilson S.K., Heinze T., Heimke M., Novak J., Ragheb A., Köhler T., Hatzichristodoulou G., Wedel T. Anatomic considerations of inflatable penile prosthetics: lessons gleaned from surgical body donor workshops. *Int. J. Impot. Res.* 2023. 35(7):672-678.
16. Bielajew B.J., Nordberg R.C., Hu J.C., Athanasiou K.A., Eleswarapu S.V. Tissue anisotropy and collagenomics in porcine penile tunica albuginea: Implications for penile structure-function relationships and tissue engineering. *Acta Biomaterialia.* 2023. 169(1): 130-137.
17. Hou S. Quantification of the Elastic and Relaxation Properties of Human Tunica Albuginea under Biaxial Loading. 2019. Blacksburg, Virginia.
18. Kandabarow A.M., Chuang E., McKenna K., Le B., McVary K., Colombo A. Tensile strength of penile tunica albuginea in a human model. *J. Urol.* 2022. 207(5S): MP38-10.
19. Hsu G.L., Brock G., Martínez-Piñero L., von Heyden B., Lue T.F., Tanagho E.A. Anatomy and strength of the tunica albuginea: its relevance to penile prosthesis extrusion. *J. Urol.* 1994. 151(5):1205-1208.
20. Dymnyk O.B. Miroshnikov YA.O., Natalenko I.L., Keres' S.V., Karayev T.V. Elastohrafiya statevoho chlena. *Radiolohichnyy visnyk.* 2017. 3-4: 50-51. [in Ukrainian]
21. Haney N.M., Kohn T.P., Nichols P.E., Hellstrom W.J.G. The effect of adjunct mechanical traction on penile length in men undergoing primary treatment for Peyronie's disease: a systematic review and meta-analysis. *Urology.* 2018. 122: 110-115.
22. Amighi A., Mills S.A., Eleswarapu S.V., Regets K.V., Mendhiratta N., Mills J.N. A modified technique for intralesional injection of collagenase *Clostridium histolyticum* for Peyronie's disease results in reduced procedural morbidity using a standardized hematoma classification rubric. *World J. Urol.* 2020. 38: 293-298.
23. Brown C.T., Wan J.C., DaJustaa D.G. Non-traumatic testicular rupture following episode of epididymo-orchitis. *Urol. Case Rep.* 2018. 17:48-49.
24. Choi Hyeon-II, Yang Dal Mo, Kim Hyun Cheol, Kim Sang Won, Jeong Hyun Seok, Moon Sung Kyung, Lim Joo Won. Testicular atrophy after mumps orchitis: ultrasonographic findings. *Korean Society of Ultrasound in Medicine.* 2020. 10.14366/usg.19097. USG 2288-5919, 2288-5943.