

УДК 617.7-007.681-073.4:615.472.3

Оцінка можливості та перспектив використання ефектів ультразвукової кавітації в скальпелі для лікування глаукоми

Шаргородський С. В., Луговський О. Ф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

На сьогодні глаукома залишається основної причиною необоротної сліпоти, як у світі, так і на Україні. Крім того, рівні інвалідності з приводу цього важкого, постійно прогресуючого захворювання з кожним роком зростають [1]. Таким чином, розробка нового медичного інструментарію, який допоможе проводити більш ефективні та менш інвазивні оперативні втручання у цієї категорії хворих є актуальним науково-прикладним завданням сучасного машинознавства [1,2].

Ключові слова: ультразвук; кавітація; біомеханіка; мікрострумені; еластичність; скальпель; глаукома; трабекула

Встановлено, домінуючу роль внутрішньоочного тиску (ВОТ), як основного фактору ризику в патогенезі розвитку і прогресування глаукоми [3]. Загальновідомо, що водяниста волога секретується в задній камера ока цилиарним епітелієм, а потім перетікає в передню камеру і залишає око через шляхи відтоку – трабекулярну сітку в іридокорнеальному куті ока [4]. Формування ВОТ відбувається у відповідь на резистентність за рахунок опору до відтоку водянистої вологи на рівні трабекулярної сітки [5]. Доведено, що при глаукомі швидкість секреції очної рідини не змінюється, тоді як в ділянці трабекулярної сітки зростає опір відтоку, що і призводить до підвищення ВОТ [5,6].

Ряд досліджень є свідченням того, що клітини трабекулярної сітки мають скорочувальні властивості і при збільшенні тонусу трабекулярної сітки збільшується опір відтоку [7]. Декілька експериментальних робіт описують, що при глаукомі спостерігається посилення стану скорочення клітин трабекулярної сітки (при зниженні еластичності фібрил трабекули) і саме це призводить до більшої жорсткості трабекулярної сітки і до підвищеного опору відтоку. Останні відкриття є свідченням того, що трабекулярна сітка у пацієнтів з глаукомою жорсткіша (менш еластичніша), ніж в контрольній групі пацієнтів відповідного віку [8].

Таким чином сучасним та перспективним напрямком є розробка нового медичного інструментарію для малоінвазивного хірургічного лікування хворих на глаукому, яке дало би змогу очищати трабекулярну сітку, зберегти еластичність фібрил трабекули та знизити опір відтоку очної рідини з ока людини.

Останніми роками явище ультразвукової кавітації знаходить все більшого застосування у техніці, так і в медицині [9]. Завдяки введенню в рідину ультразвукових коливань високої інтенсивності забезпечується можливість знезараження та якісного видалення забруднень з поверхонь [9]. Реалізація механізму кавітаційного очищення забезпечується шляхом впливу на забруднення та мікроорганізми фізичних процесів, які супроводжують схлопування кавітаційних бульбашок, що утворюються в стадії розрядження ультразвукової хвилі [9].

Кумулятивний струмінь, який утворюється при схлопуванні кавітаційного бульбашки, завдає руйнівну дію на затверділі забруднення або мікроорганізми, що знаходяться в

безпосередній близькості. Крім того знищенню мікроорганізмів активно сприяють: ударна дія сферичних хвиль тиску; інтенсивні мікротечі, термічний вплив на мікроорганізми за рахунок локального підвищення температури до 1000°C , перепад тисків по довжині ультразвукової хвилі та активізація окисних процесів у кавітаційній ділянці [10].

В офтальмології вже відомі перші застосування ультразвукової кавітації – ультразвукова факоемулсифікація катаракти. Цей метод дозволяє видаляти катаракту при різних ступенях щільності кришталика. Для реалізації цього методу розроблено багатофункціональний малогабаритний ультразвуковий інструмент – ультразвуковий факоемулсифікатор. Визначені оптимальні показники амплітуди коливань, інтенсивності, потужності та тривалості енергії ультразвукової кавітації для отримання безпечного результату фрагментації та видалення змутненого кришталика, що мінімально впливає на тканини ока [11].

Факоемулсифікатор успішно застосовується при видаленні катаракти, однак для хірургічного лікування глаукоми прилад не пристосований. Однак нові можливості в боротьбі за усунення опору відтоку внутрішньоочної рідини можуть бути отримані шляхом застосування ультразвукової кавітації для очищення пор трабекулярної сітки у юкстаканалікулярній ділянці. Це сприяло би збереженню рівня ВОТ на межі «цільового», не швидкого тиску для ока і, відповідно, успішному лікуванню хворих на глаукому.

Метою нашої роботи стала розробка мультифункціонального ультразвукового скальпелю для хірургічного лікування хворих на глаукому шляхом дослідження впливу ультразвукової кавітації на структури ока та склад внутрішньоочної рідини та визначення критеріїв прогнозування міцності, довговічності та надійності його функціонування з метою удосконалення результатів хірургічних втручань при цій патології.

Нами було проведено модернізацію робочої частини факоемулсифікатора – факоголки, що застосовується для видалення змутненого кришталика. Завдяки тому, що новітні моделі факоемулсифікаторів дозволяють хірургу точно дозувати потужність, амплітуду і частоту ультразвукових коливань, вибирати різні режими роботи ультразвукового перетворювача, що модулює як поздовжні, так і складні торсіонні коливання ультразвукової факоголки [12], ми залишили в конструкції скальпеля основу (базис) факоголки, яка має можливість дозувати обсяг подачі розчину в передню камеру і швидкість аспірації відпрацьованого матеріалу («продуктів життєдіяльності ока»).

Запропонований нами глаукомний скальпель дозволить хірургу прочищати пори трабекулярного апарату в іридокорнеальному куті ока від «продуктів життєдіяльності ока», до якого відносяться: пігмент, ексфоліативний матеріал тощо. Цей матеріал шкідливий для ока, оскільки забиває трабекулярну сітку, знижує її еластичність, підвищує опір відтоку та, відповідно, є основною причиною підвищення ВОТ і розвитку та прогресування глаукоми [5]. Ультразвуковий глаукомний скальпель дозволить очищати трабекулу самим м'яким способом – без втрати і розвитку набряку оточуючих тканин ока, пошкодження кровоносних судин.

Ми залишили в запропонованому нами скальпелі в робочій частині ультразвукового інструменту (основа глаукомного скальпелю) порожнисту голку, що є складовою частиною ультразвукового трансформатора коливальної швидкості і передає ультразвукові коливання та застосовуються в факоемулсифікаторі для дроблення кришталикових мас [11]. В нашому глаукомному скальпелі цей елемент буде виконувати роль емулсифікатора пігменту і ексфоліативного матеріалу.

Крім того, через внутрішню порожнину скальпелю – аспіраційний канал, буде проходити всмоктування зруйнованих фрагментів, а через коаксіально розташовану по відношенню до порожнистої голки – силіконову манжету проводиться подача замісної іригаційної рідини.

Також в запропонованому ультразвуковому глаукомному скальпелю ми обрали за джерело ультразвуку – п'єзоелектричний кристал, осцилюючий з частотою 20000-60000 разів

в секунду. Такий показник був обраний з урахуванням рекомендацій виробників факомашин з урахуванням стандартного ряду частот 22; 26,5; 44; 66 кГц.

Нами була розроблена спеціальна насадку глаукомного скальпелю, яка фіксується на робочу частину ультразвукового інструменту. Конструкція насадки дозволяє без травмування оточуючих тканин, вводити інструмент в середину ока через дозований розріз шириною в 1,8-2,2 міліметра і проходити без травмування оточуючих тканин в протилежний від розрізу іридокорнеальний кут до трабекулярної сітки.

Слід відмітити, що конструкція поверхні робочої частини скальпелю запобігає травмуванню елементів ока при пересування скальпелю і забезпечує утворення ефективної кавітаційної області. Збудження ультразвукової кавітації призводить до активації звукокапілярного ефекту, при якому мікроскопічні кавітаційні бульбашки, колапсуючи ударними сферичними хвилями, прочищають капілярні канали трабекулярної сітки. Завдяки утворенню кумулятивного струмінню рідини забезпечується ефективне руйнування затверділих крихких забруднень. При цьому відновлюється еластичність трабекулярної сітки, основної складової дренажної системи ока людини [13].

Подрібнені частинки ексфолювативного матеріалу, пігменту і іншого матеріалу, розташованого в порах трабекулярної сітки, видаляються з ока через аспіраційний канал.

Конструкція глаукомного скальпелю забезпечує безшовне втручання і дозволяє самогерметизації тканин в ділянці розтину, що скорочує час реабілітації без ускладнень.

Висновки

Розробка ультразвукового глаукомного скальпелю є актуальним науково-прикладним завданням сучасного машинознавства.

Пристрій дозволить очистити пори трабекулярної сітки, зберегти і відновити її еластичність, знизити опір відтоку внутрішньоочної рідини, що буде сприяти ефективному зниженню внутрішньоочного тиску. Застосування такого інструменту допоможе хірургам офтальмологам проводити менш інвазивні та більш безпечні втручання, що буде сприяти нормалізації рівня внутрішньоочного тиску, упередженню прогресування та успішному лікуванню глаукоми.

Список використаних джерел

1. S. Resnikoff, D. Pascolini, D. Etya'ale, I. Kocur, R. Pararajasegaram, G.P. Pokharel, S.P. Mariotti. Global data on visual impairment in the year 2002. *Bull World Health Organ* vol.82, pp. 844-851, 2004. doi: [10.1590/S0042-96862004001100009](https://doi.org/10.1590/S0042-96862004001100009).
2. S.O. Rykov, N.V. Medvedovska, Yu. V. Barinov. "Retrospective analysis of regional features of staffing of the ophthalmological service of Ukraine" (in Ukraine). *Archives of Ophthalmology of Ukraine* no. 7(2). pp.6-10, 2019. doi: [10.22141/2309-8147.7.2.2019.169681](https://doi.org/10.22141/2309-8147.7.2.2019.169681).
3. M.C. Leske, A. Heijl, M. Hussein, B. Bengtsson, L. Hyman, E. Komaroff. Factors for glaucoma progression and the effect of treatment: the early manifest glaucoma trial. *Arch Ophthalmol*, vol. 121, pp. 48-56, 2003. doi: [10.1001/archophth.121.1.48](https://doi.org/10.1001/archophth.121.1.48).
4. E.R. Tamm. The trabecular meshwork outflow pathways: structural and functional aspects. *Exp Eye Res*, vol. 88 (4), pp. 648-655, 2009. doi: [10.1016/j.exer.2009.02.007](https://doi.org/10.1016/j.exer.2009.02.007).
5. M. Johnson. What controls aqueous humour outflow resistance? *Exp Eye Res*, vol. 82, pp.545-557, 2006. doi: [10.1016/j.exer.2005.10.011](https://doi.org/10.1016/j.exer.2005.10.011).
6. E.R. Tamm, R. Fuchshofer. What increases outflow resistance in primary open-angle glaucoma? *Surv Ophthalmol*, no. 52 (2), pp.101-S104, 2007. doi: [10.1016/j.survophthal.2007.08.002](https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2007.08.002).
7. M. Wiederholt, H. Thieme, F. Stumpff. The regulation of trabecular meshwork and ciliary muscle contractility. *Prog Retin Eye Res*, vol. 19 (3), pp. 271-295, 2000. doi: [10.1016/s1350-9462\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/s1350-9462(99)00015-4).
8. J.A. Last, T. Pan, Y. Ding, C.M. Reilly, K. Keller, T.S. Acott, M.P. Fautsch, C.J. Murphy, P. Russell. Elastic modulus determination of normal and glaucomatous human trabecular meshwork. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, vol. 52, pp. 2147-2152, 2011. doi: [10.1167/iovs.10-6342](https://doi.org/10.1167/iovs.10-6342).
9. O.F. Lugovskyi, A.V. Movchanyuk, I.A. Grishko. "Evaluation of methods Evaluation of methods of water disinfection". (in Ukraine). *Bulletin of the National Technical University of Ukraine*. Kyiv Polytechnic Institute. 2008.

10. O.M. Yakhno, O.O. Lugovska, A.V. Movchanyuk. "Research of possibilities of ultrasonic cavitation cleaning technology of elastic surfaces". (in Ukraine). 2UDK 621.647.23, NTU of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv. 2010.
11. Y.A. Hrytsenko, S.K. Dmitriev, N.V. Pasechnikova. "An improved method for determining the strength characteristics of the lens in patients with age-related cataract using ultrasonic B-scan data". (in Ukraine). *Ophthalmological Journal*, vol.1, pp.96-101, 2015.
12. Z.M. Naumkina, V.I. Zubchk. Modernization of the phacoemulsification instrument for different types of oscillations. (in Ukraine). *Biomedical Engineering and Technology*. vol. 4, pp. 8-13, 2020. doi: [10.20535/2617-8974.2020.4.221831](https://doi.org/10.20535/2617-8974.2020.4.221831).
13. S.V. Shargorodsky, O.F. Lugovsky. Possibility of using cavitation microjets to restore the elasticity of the trabeculae of the anterior chamber angle of eyes of patients with glaucoma. (in Ukraine). *Youth Innovations in Mechanical Engineering* 2024. UDC. 617.7-007.681-073.4:615.472.3,2024. <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30446>.

Assessment of the possibility and prospects of using the effects of ultrasonic cavitation in the scalpel for the treatment of glaucoma

Shargorodsky Serhiy, Lugovsky Olexandr

Today, glaucoma remains the main cause of irreversible blindness, both in the world and in Ukraine. In addition, the levels of disability due to this severe, constantly progressive disease are increasing every year [1]. Thus, the development of new medical tools that will help to carry out more effective and less invasive surgical interventions in this category of patients is an urgent scientific and applied task of modern mechanical engineering [1,2].

Keywords: ultrasound; cavitation; biomechanics; micro streams; elasticity; scalpel; glaucoma; trabeculae