

(47)

Metody obliczania nieźborności indukowanej chirurgicznie

Methods of calculating surgically induced astigmatism

Olena Wilczyńska, Michał Wilczyński

Z Kliniki Chorób Oczu I Katedry Chorób Oczu Uniwersytetu Medycznego w Łodzi
Kierownik: prof. dr hab. n. med. Wojciech Omulecki

Summary:

Evaluation of surgically induced astigmatism is important, as it allows to thoroughly assess the influence of surgical incision on corneal refraction. This influence can be established by calculating surgically induced astigmatism according to an appropriate mathematical method.

The purpose of the study was to describe various mathematical methods used in the current literature to calculate surgically induced astigmatism.

When comparing results of calculation of surgically induced astigmatism among different studies, it is necessary to take into account values obtained with the use of the same method of calculation, as various methods evaluate astigmatism differently.

Słowa kluczowe:

fakoemulsyfikacja, nieźborność indukowana chirurgicznie, metody obliczeń.

Key words:

phacoemulsification, surgically induced astigmatism, methods of calculation.

1. Wstęp

We współczesnej chirurgii przedniego odcinka oka ważna jest ocena astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie, ponieważ pozwala dokładnie określić wpływ cięcia operacyjnego na refrakcję rogówki. Wpływ ten możemy ustalić, obliczając astygmatyzm indukowany odpowiednio dobraną metodą matematyczną. Pełniejsze zrozumienie wpływu zabiegu na krzywiznę rogówki pozwala na poprawę wyników refrakcyjnych przyszłych zabiegów, dzięki możliwości ich lepszego planowania.

Szerokie zainteresowanie zagadnieniem astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie zaowocowało opracowaniem specjalnych metod matematycznych do jego obliczenia, a także dużą liczbą publikacji w piśmiennictwie światowym. Jednakże fakt, iż nie wszyscy autorzy stosują te metody lub stosują różne metody, stwarza problem w porównywaniu wyników ich prac. Pierwotnie metody obliczania nieźborności indukowanej powstały na potrzeby oceny wyników operacji zaćmy, jednakże obecnie są one stosowane w celu oceny wyników szeroko pojętej chirurgii przedniego odcinka gałki ocznej.

2. Cel

Celem pracy jest przedstawienie różnych metod matematycznych stosowanych do obliczania astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie (ang. surgically induced astigmatism – SIA).

3. Matematyczne metody obliczania nieźborności indukowanej chirurgicznie

Na wstępie należy sprecyzować pojęcia nieźborności pooperacyjnej i nieźborności indukowanej chirurgicznie, ponieważ w piśmiennictwie można się spotkać z niewłaściwym użyciem tych terminów. Nieźborność pooperacyjna jest to

nieźborność zmierzona po operacji. Nieźborność indukowana chirurgicznie jest to różnica między nieźbornością pooperacyjną a nieźbornością przedoperacyjną (do jej obliczenia stosuje się różne metody matematyczne). W polskim piśmiennictwie stosowane są równolegle terminy „nieźborność” i „astygmatyzm”, dlatego też w niniejszej pracy wymiennie są używane obydwa określenia.

Celem obliczeń SIA, na podstawie przed- i pooperacyjnych pomiarów keratometrycznych, jest uzyskanie informacji na temat zmiany wielkości astygmatyzmu i jego kierunku oraz stabilności refrakcyjnej różnych cięć stosowanych w operacjach w zakresie przedniego odcinka oka (np. operacji zaćmy). Z punktu widzenia refrakcyjnego dużą wartość ma takie cięcie operacyjne, które powoduje przewidywalną zmianę wielkości astygmatyzmu i minimalną zmianę kierunku astygmatyzmu (1).

W literaturze światowej są opisywane różne metody obliczania SIA, które w większości opierają się na kalkulacjach trygonometrycznych. Poniżej zostaną opisane najczęściej używane obecnie metody obliczeń SIA.

3.1. Metoda odejmowania

Metoda ta jest najprostszym sposobem obliczenia SIA i polega na odjęciu wielkości astygmatyzmu przedoperacyjnego (A) od wielkości astygmatyzmu pooperacyjnego (B) bez uwzględnienia osi.

$$SIA = B - A$$

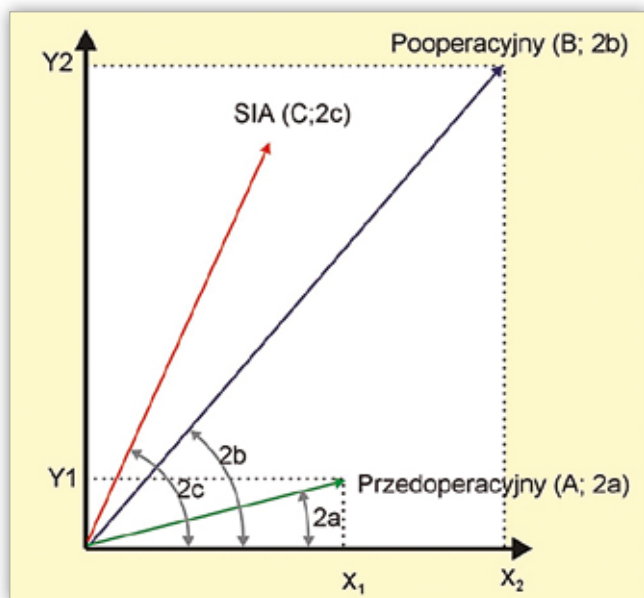
Metoda ta jest poprawna tylko wtedy, jeśli oś astygmatyzmu jest taka sama przed operacją i po operacji, w przeciwnym razie wyniki dają fałszywą ocenę sytuacji (1).

3.2. Analiza wektorowa

Kilku niezależnych od siebie autorów stworzyło metody wektorowej analizy SIA, które bazują na regułach trygonometrycznych i dają identyczne wyniki (2-5).

Podstawą analizy wektorowej jest teoria skośnie skrzyżowanych cylindrów opisana przez Stokesa w 1849 r., według której zsumowanie dwóch skrzyżowanych cylindrów może być określone graficznie. W 1968 r. Naylor (2) zasugerował, iż metoda ta może być użyta do określenia różnicy refrakcji, spowodowanej przez zabieg operacyjny. Astygmatyzm może być przedstawiony w formie wektora, który to wektor ma kierunek i długość. Kierunek wektora przedstawia podwojoną oś astygmatyzmu (podwojenie osi jest niezbędne do zastosowania obliczeń trygonometrycznych), natomiast długość wektora reprezentuje wielkość astygmatyzmu w dioptriach. Różnicą wektorów po- i przedoperacyjnego jest wektor astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie. Różnica ta może być przedstawiona graficznie lub obliczona za pomocą wzorów matematycznych, takich jak twierdzenie Pitagorasa lub funkcje trygonometryczne.

Wektor cylindra jest przedstawiony w układzie współrzędnych xy (ryc. 1). Jeśli astygmatyzm przedoperacyjny (amplitu-



Ryc. 1. Analiza wektorowa, wg (1).
Fig. 1. Vector analysis, according to (1).

da A, oś a) i pooperacyjny (amplituda B, oś b) przedstawimy graficznie w kierunku ich zdwojonych kątów, to wtedy $x_a = A \cdot \cos 2a$, $y_a = A \cdot \sin 2a$, $x_b = B \cdot \cos 2b$ i $y_b = B \cdot \sin 2b$. Astygmatyzm indukowany SIA (amplituda C, oś c) jest nieznanym wektorem do wyliczenia. Stosując twierdzenie Pitagorasa, C może być znalezione jako przeciwprostokątna w trójkącie prostym (1).

$$C^2 = (y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2$$

$$y_2 - y_1 = y_b - y_a = B \cdot \sin 2b - A \cdot \sin 2a$$

$$x_2 - x_1 = x_b - x_a = B \cdot \cos 2b - A \cdot \cos 2a$$

$$SIA = C = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$$

Do obliczenia osi wektora indukowanego astygmatyzmu stosuje się wzór:

$$\text{Oś SIA} = c = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{B \cdot \sin 2b - A \cdot \sin 2a}{B \cdot \cos 2b - A \cdot \cos 2a} \right)$$

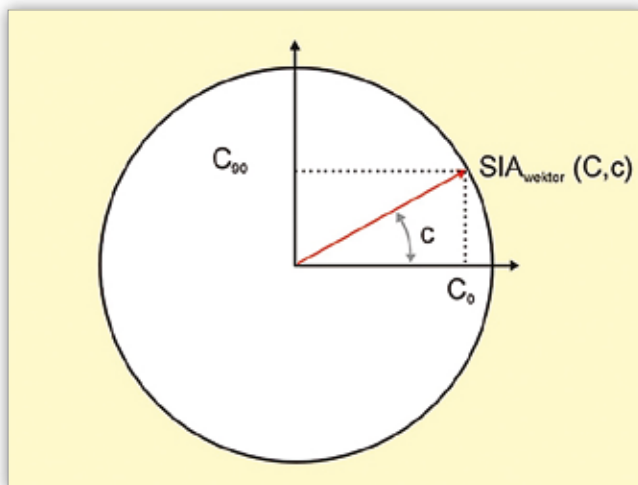
Do ww. wzoru stosuje się następujące warunki:
jeśli mianownik = 0, to oś SIA wynosi 90°,
jeśli mianownik < 0, to do osi SIA należy dodać 90°,
jeśli oś SIA > 180°, to należy odjąć 180°,
jeśli oś SIA < 0°, należy dodać 180°.

Wektor astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie jest tylko teoretyczną konstrukcją i sam w sobie nie odzwierciedla rzeczywistych wyników refrakcyjnych zabiegu (6). Metoda wektorowa dostarcza nam informacji na temat procesu, w wyniku którego uzyskano astygmatyzm pooperacyjny.

3.3. Dekompozycja wektora

W celu uzyskania informacji na temat wpływu zabiegu na refrakcję rogówki analiza wektorowa wymaga dalszego przetworzenia, mianowicie optycznej dekompozycji wektora. Ponadto wyników analizy wektorowej (wielkość i oś indukowanego cylindra) nie można jednocześnie analizować za pomocą metod statystyki opisowej, ponieważ są to 2 parametry opisujące 1 wynik (7).

W celu pokonania tego problemu należy indukowany cylinder (wielkość C, oś c) rozłożyć na komponenty pionową C_{90} i poziomą C_0 , czyli dokonać optycznej dekompozycji (8) (ryc. 2).



Ryc. 2. Dekompozycja wektora. C90 – komponenta astygmatyzmu prostego, C0 – komponenta astygmatyzmu odwrotnego, wg (1).

Fig. 2. Vector decomposition method. C90 – with-the-rule component of astigmatism, C0 – against-the-rule component of astigmatism, according to (1).

$$C_{90} = C \cdot \sin^2 c$$

$$C_0 = C \cdot \cos^2 c$$

C_{90} jest komponentą astygmatyzmu prostego (ang. with-the-rule astigmatism – WTR), C_0 – komponentą astygmatyzmu odwrotnego (ang. against-the-rule astigmatism – ATR).

3.4. Metoda Cravy'ego

Cravy (9) stworzył kilka wskaźników, które opisują różne aspekty astygmatyzmu indukowanego. Wskaźnik K_t opisuje całkowitą zmianę niezborności. Wskaźnik ΔK opisuje zmianę niezborności w kierunku niezborności prostej lub odwrotnej. Poniżej zostanie opisana metoda obliczenia ΔK , ponieważ właśnie ta metoda jest używana w piśmiennictwie dotyczącym astygmatyzmu indukowanego.

W metodzie tej cylinder jest przedstawiony w układzie współrzędnych xy (ryc. 3). Astygmatyzm przed- i pooperacyjny (wielkość A , oś a oraz wielkość B , oś b) rzutowany jest na oś x jako $x_a = A \cdot \cos a$ i $x_b = B \cdot \cos b$ oraz rzutowany jest na oś y jako $y_a = A \cdot \sin a$ i $y_b = B \cdot \sin b$. Następnie porównujemy wartości osi a i b , odejmujemy mniejszą wartość od większej. Jeśli różnica jest większa niż 90° , należy dodać 180° do jednej z wartości lub odjąć 180° od jednej z wartości.

Różnica na osi x :

$$\Delta x = x_b - x_a = B \cdot \cos b - A \cdot \cos a$$

Różnica na osi y :

$$\Delta y = y_b - y_a = B \cdot \sin b - A \cdot \sin a$$

Istnieje konwencja znaków dla metody Cravy'ego:

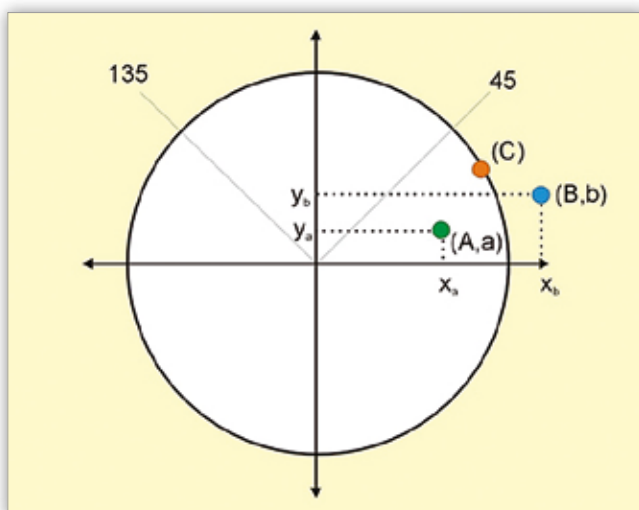
jeśli $|x_b| < |x_a|$, to Δx ma znak (+), w przeciwnym wypadku Δx ma znak (-),

jeśli $|y_b| > |y_a|$, to Δy ma znak (+), w przeciwnym wypadku Δy ma znak (-).

Astygmatyzm indukowany chirurgicznie (SIA), czyli ΔK , obliczamy po zastosowaniu konwencji znaków:

$$SIA = \Delta K = (\pm \Delta x) + (\pm \Delta y)$$

Jeśli astygmatyzm indukowany (SIA) przybiera znak (-), to zmiana jest w kierunku astygmatyzmu odwrotnego. Znak (+) oznacza, iż zmiana jest w kierunku astygmatyzmu prostego (1,9).



Ryc. 3. Metoda Cravy'ego, wg (1).

Fig. 3. Cravy's method, according to (1).

3.5. Metoda wartości biegunowych Naesera

Naeser stworzył metodę wartości biegunowych, w której wielkość i oś astygmatyzmu są zredukowane do pojedynczej wartości (10,11). Wzór ogólny dla tej metody jest następujący:

$$KP = M \cdot \{\sin^2 [(\alpha + 90) - \Omega] - \cos^2 [(\alpha + 90) - \Omega]\}$$

gdzie:

M = wielkość astygmatyzmu w dioptriach cylindrycznych,

α = południk astygmatyzmu w stopniach,

$\emptyset = (\alpha + 90)$ = oś astygmatyzmu w stopniach,

Ω = kierunek płaszczyzny badanej,

KP = wartość biegunowa.

Astygmatyzm indukowany (ΔKP) jest różnicą między po- i przedoperacyjnymi wartościami biegunowymi:

$$\Delta KP = KP_{\text{poop.}} - KP_{\text{przedop.}}$$

Ω i $(\Omega + 90)$ oznaczają odpowiednio kierunki dwóch prostopadłych płaszczyzn badanych. Wzór ogólny zawsze oblicza wartość biegunową, czyli różnicę między komponentami dioptrycznymi rzutowanymi na płaszczyzny w kierunkach Ω i $(\Omega + 90)$. Wybierając różne wartości Ω , możemy przeanalizować różne pary prostopadłych płaszczyzn. I tak, na przykład, jeśli $\Omega = 90^\circ$ (badamy południk pionowy):

$$KP(90) = M \cdot (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)$$

Wzór ten wylicza równowagę między komponentami astygmatyzmu prostego i odwrotnego. Wartość dodatnia oznacza astygmatyzm indukowany prosty, wartość ujemna – odwrotny. Badając ΔKP w południku cięcia chirurgicznego, określamy wpływ cięcia na refrakcję rogówki („moc” zabiegu) – dodatnie ΔKP wykazują wzmocnienie południka chirurgicznego, ujemne ΔKP wykazuje zaś spłaszczenie (osłabienie). W przypadku cięć pionowych na godzinie 12 oblicza się $\Delta KP(90)$, dla cięć górnych skroniowych i skroniowych odpowiednio $\Delta KP(135)$ i $\Delta KP(180)$. Można również wyliczyć $\Delta KP(+45)$, czyli ΔKP w 45° od południka cięcia. Wartość $\Delta KP(+45)$ pokazuje nam stopień rotacji astygmatyzmu spowodowany przez operację – im większa wartość, tym większa rotacja. Wartość zerowa pokazuje, że rotacja nie wystąpiła (jest to sytuacja najbardziej pożądana).

3.6. Inne metody oceny astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie

Toulemont i wsp. (12) wprowadzili metodę wieloczynnikowej analizy prawdopodobieństwa w celu oceny astygmatyzmu indukowanego chirurgicznie.

Alpins (13) na podstawie analizy wektorowej stworzył nowe wskaźniki, które dają pełniejszy obraz SIA. Wprowadził on również pojęcie docelowego indukowanego astygmatyzmu (ang. target induced astigmatism – TIA).

W przypadku wykonania topografii rogówki możliwe jest zastosowanie analizy Fouriera. Analiza Fouriera przekształca dane z topografii rogówki do następujących parametrów: moc ekwiwalentu sferycznego, harmonia decentracji, astygmatyzm regularny i nieregularny (6,14). Umożliwia to dokładną ocenę astygmatyzmu regularnego i nieregularnego indukowanego chirurgicznie.

4. Przykłady pozwalające porównać różne metody matematyczne stosowane do oceny SIA

Przedstawiamy trzy przykłady, które pozwolą na praktyczne porównanie różnych metod matematycznych stosowanych do oceny SIA.

Przykład 1.

Keratometria przedoperacyjna: $K_1 = 42,0$ D ax 180° , $K_2 = 44,0$ D ax 90° (astygmatyzm rogówkowy przedoperacyjny: 2 Dcyl ax 90°). Keratometria pooperacyjna $K_1 = 44,0$ D ax 180° , $K_2 = 42,0$ D ax 90° (astygmatyzm pooperacyjny: 2 Dcyl ax 180°). Widzimy, że nastąpiły duże zmiany w kształcie rogówki, zabieg „pokonał” 2 D astygmatyzmu prostego i spowodował 2 D astygmatyzmu odwrotnego, czyli zmiana wynosi 4 D. Natomiast po zastosowaniu metody odejmowania astygmatyzm indukowany wynosi: $2\text{ D} - 2\text{ D} = 0\text{ D}$. Metoda odejmowania nie obrazuje zmian dokonanych w krzywiznie rogówki. Dla porównania, wartości SIA dla tego przykładu obliczone innymi metodami są następujące: metoda wektorowa 4 D, metoda dekompozycji wektora: $C_{90} = 0\text{ D}$, $C_0 = 4\text{ D}$. SIA obliczone metodą Cravy'ego wynosi -4 D, metodą Naesera wynosi -4 D. Wartości ujemne w metodach Cravy'ego i Naesera mówią nam o rotacji osi astygmatyzmu w kierunku astygmatyzmu odwrotnego.

Przykład 2.

Keratometria przedoperacyjna: $K_1 = 43,0$ D ax 5° , $K_2 = 41,5$ D ax 95° (astygmatyzm rogówkowy przedoperacyjny: 1,5 Dcyl ax 5°). Keratometria pooperacyjna: $K_1 = 41,25$ D ax 5° , $K_2 = 43,25$ D ax 95° (astygmatyzm pooperacyjny: 2,0 Dcyl ax 95°). Nastąpiła zmiana z 1,5 D astygmatyzmu odwrotnego przedoperacyjnego na 2,0 D astygmatyzmu prostego. SIA w metodzie odejmowania wynosi 0,5 D. Wartości SIA dla innych metod są następujące: metoda wektorowa 3,5 D, metoda dekompozycji wektora: $C_{90} = 3,47\text{ D}$, $C_0 = 0,03\text{ D}$, według metody Cravy'ego wynosi 3,53 D, według metody Naesera wynosi 3,45 D. Duże wartości C_{90} i duże dodatnie wartości w metodach Cravy'ego i Naesera pokazują zmianę w kierunku astygmatyzmu prostego.

Przykład 3.

Keratometria przedoperacyjna: $K_1 = 44,0$ D ax 180° , $K_2 = 45,0$ D ax 90° (astygmatyzm rogówkowy przedoperacyjny: 1,0 Dcyl ax 90°), keratometria pooperacyjna: $K_1 = 44,0$ D ax 160° , $K_2 = 45,0$ D ax 70° (astygmatyzm rogówkowy pooperacyjny: 1,0 Dcyl ax 70°). W metodzie odejmowania wartość SIA wynosi 0, co sugeruje, że krzywizna rogówki nie zmieniła się. W metodzie wektorowej SIA = 0,68 D. W metodzie dekompozycji wektora $C_{90} = 0,23\text{ D}$, zaś $C_0 = 0,46\text{ D}$, co oznacza że dominowała komponenta astygmatyzmu odwrotnego. W metodzie Naesera wartość $\Delta KP(90) = -0,234\text{ D}$, co oznacza, że zmniejszyła się komponenta niezborności prostej (a wzrosła odwrotnej). Podobnie w metodzie Cravy'ego SIA = -0,40 D, co wskazuje na zmianę w kierunku astygmatyzmu odwrotnego.

5. Podsumowanie

Współczesna chirurgia zaćmy musi sprostać wysokim oczekiwaniom pacjentów co do jakości widzenia po zabiegu. Ważnym

elementem uzyskania dobrej nieskorygowanej ostrości wzroku jest kontrola nad astygmatyzmem indukowanym chirurgicznie. Niezborność indukowana chirurgicznie jest zagadnieniem złożonym, tak jak i jego matematyczna ocena.

W literaturze światowej astygmatyzm indukowany chirurgicznie jest obliczany za pomocą szeregu różnych metod matematycznych, które nie są zamienne, gdyż każda z nich nieco inaczej ujmuje ten problem. Dlatego też podczas porównywania wartości astygmatyzmu indukowanego, wartości podawanych w różnych pracach, należy uwzględnić wartości uzyskane tą samą metodą obliczeń. Nie należy stosować metody odejmowania, gdyż jej wyniki nie są wiarygodne.

Piśmiennictwo:

- Nielsen PJ: *Complications and outcomes: data collection and analysis*. (w:) Yanoff M., Duker J.S. (red.): *Ophthalmology*. Mosby, St Louis, 1998, CD-ROM.
- Naylor EJ: *Astigmatic difference in refractive errors*. Br J Ophthalmol 1968, 52, 422-425.
- Jaffe NS, Clayman HM: *The pathophysiology of corneal astigmatism after cataract extraction*. Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol 1975, 79, 615-630.
- Holladay JT, Cravy TV, Koch DD: *Calculating the surgically induced refractive change following ocular surgery*. J Cataract Refract Surg 1992, 18, 429-443.
- Kaye SB, Patterson A: *Analyzing refractive changes after anterior segment surgery*. J Cataract Refract Surg 2001, 27, 50-60.
- Morlet N, Minassian D, Dart J: *Astigmatism and the analysis of its surgical correction*. Br J Ophthalmol 2001, 85, 1127-1138.
- Holladay JT, Dudeja DR, Koch DD: *Evaluating and reporting astigmatism for individual and aggregate data*. J Cataract Refract Surg 1998, 24, 57-65.
- Olsen T, Dam-Johansen M: *Evaluating surgically induced astigmatism*. J Cataract Refract Surg 1994, 20, 517-522.
- Cravy TV: *Calculation of the change in corneal astigmatism following cataract extraction*. Ophthalmic Surg 1979, 10, 38-49.
- Naeser K, Behrens JK: *Correlation between polar values and vector analysis*. J Cataract Refract Surg 1997, 23, 76-81.
- Naeser K, Hjortdal J: *Polar value analysis of refractive data*. J Cataract Refract Surg 2001, 27, 86-94.
- Toulemont PJ: *Multivariate analysis versus vector analysis to assess surgically induced astigmatism*. J Cataract Refract Surg 1996, 22, 977-982.
- Alpins N: *Astigmatism analysis by the Alpins method*. J Cataract Refract Surg 2001, 27, 31-49.
- Olsen T, Dam-Johansen M, Bek T, Hjortdal J: *Corneal versus scleral tunnel incision in cataract surgery: A randomized study*. J Cataract Refract Surg 1997, 23, 337-341.

Praca wpłynęła do Redakcji 21.08.2008 r. (1067)
Zakwalifikowano do druku 01.07.2009 r.

Adres do korespondencji (Reprint requests to):

dr n. med. Olena Wilczyńska
Klinika Chorób Oczu Uniwersytetu Medycznego w Łodzi
Szpital Kliniczny Nr 1 im. N. Barlickiego
ul. Kopcinskiego 22
90-153 Łódź