

Badanie struktury soczewek kontaktowych z użyciem metod PALS, MIR, Ramana w aspekcie bezpieczeństwa osób przebywających w warunkach działania promieniowania jonizującego

Study of the structure of contact lenses using PALS, MIR and Raman spectroscopy in the regard of safety of persons exposed to ionizing radiation

Mariusz Budaj^{1,A-D}, Andrzej Michalski^{2,B-D}, Bogdan Miśkowiak^{1,3,E-F}, Katarzyna Filipecka^{4,A-D}, Sylwia Mandecka^{5,B-C}

¹ Zakład Optometrii, Katedra Chorób Oczu i Optometrii, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Polska

² Klinika Chorób Oczu, Katedra Chorób Oczu i Optometrii, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Polska

³ Wyższa Szkoła Zdrowia, Urody i Edukacji w Poznaniu, Polska

⁴ Zakład Badań Strukturalnych i Fizyki Medycznej, Instytut Fizyki, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Polska

⁵ Zakład Radioterapii, Wojewódzki Szpital Specjalistyczny im. Najświętszej Maryi Panny w Częstochowie, Polska

A – research concept and design; B – collection and/or assembly of data; C – data analysis and interpretation;

D – writing the article; E – critical revision of the article; F – final approval of the article

Polymers in Medicine, ISSN 0370-0747 (print), ISSN 2451-2699 (online)

Polim Med. 2018;48(1):5–9

Adres do korespondencji

Mariusz Budaj

E-mail: mariuszbudaj@neostrada.pl

Źródła finansowania

Brak

Konflikt interesów

Nie występuje

Praca wpłynęła do Redakcji: 17.05.2018 r.

Po recenzji: 6.09.2018 r.

Zaakceptowano do druku: 25.09.2018 r.

Cytowanie

Budaj M, Michalski A, Miśkowiak B, Filipecka K, Mandecka S. Badanie struktury soczewek kontaktowych z użyciem metod PALS, MIR, Ramana w aspekcie bezpieczeństwa osób przebywających w warunkach działania promieniowania jonizującego. *Polim Med.* 2018;48(1):5–9. doi:10.17219/pim/96287

DOI

10.17219/pim/96287

Copyright

© 2018 by Wrocław Medical University

This is an article distributed under the terms of the

Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Streszczenie

Wielu pacjentów i przedstawicieli personelu medycznego poddawanych działaniu promieniowania jonizującego podczas realizacji procedur diagnostycznych bądź terapeutycznych ma wady wzroku, które korygowane są m.in. miękkimi soczewkami kontaktowymi. Na bezpieczeństwo użytkowania tego typu korekcji mogą mieć wpływ zmiany w strukturze wewnętrznej soczewek, które mogą modyfikować ich uwodnienie lub transport tlenu do rogówki. Niezbędna jest zatem analiza wpływu czynników zewnętrznych, w tym promieniowania jonizującego wykorzystywanego w medycynie, na wybrane parametry soczewek kontaktowych, a szczególnie zbadanie i porównanie występowania swobodnych objętości w strukturze wewnętrznej polimerowych miękkich soczewek kontaktowych. Ewentualna zmiana rozmiarów i ich ilości w strukturze materiałów miękkich soczewek kontaktowych, która wynikałaby z oddziaływania promieniowania jonizującego, może wpływać niekorzystnie na przepuszczalność tlenu. Do przeprowadzenia wyżej wspomnianej analizy można użyć różnych metod, m.in. spektroskopii czasów życia anihilujących pozytonów (PALS), spektroskopii Ramana i MIR. Podczas użytkowania soczewek kontaktowych, ograniczających transport tlenu do rogówki zwiększa się ryzyko jej niedotlenienia, które stanowi jedno z możliwych powikłań. Badania skutków oddziaływania różnych typów promieniowania jonizującego (X, gamma czy beta) na materiały wykorzystywane do produkcji soczewek kontaktowych są ważne, w kontekście bezpieczeństwa użytkowników soczewek kontaktowych.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, soczewki kontaktowe, wolne objętości, anihilacja pozytonów

Abstract

Among patients and health professionals who are exposed to ionizing radiation during diagnostic and therapeutic procedures, refractive errors are common and soft contact lenses are widely used to correct them. Changes in the inner structure of contact lens may influence the safety of its usage through modification of its water content or oxygen accessibility to cornea. Therefore, analysis of impact of external factors, therein ionizing radiation used in medicine, on contact lenses parameters is necessary, particularly to compare the presence of free volume gaps in the structure of the polymer soft contact lenses. Possible change in dimensions or quantity of free volume gaps in the structure of the material caused by the exposure to ionizing radiation may have negative influence on oxygen permeability. To prevent such process, different means could be used, i.e., positron annihilation lifetime spectroscopy (PALS), Raman spectroscopy and mid-infrared spectroscopy (MIR). Use of contact lenses which reduce transport of oxygen to cornea increases the risk of corneal hypoxia – one of the possible complications of using contact lenses. Research on effects of different types of ionizing radiation (X-ray, gamma, beta) on materials used in production of contact lenses is vital because of the connection of this issue with the safety of contact lenses wearers. Such research can also shed light on the problem of safe use of contact lenses by persons exposed to ionizing radiation.

Key words: ionizing radiation, contact lenses, free volumes, positron annihilation

Wstęp

Promieniowanie jonizujące stosowane jest w medycynie już od ponad 100 lat. Korzyści, jakie z tego wynikają, są nieocenione. W każdym przypadku wykorzystania promieniowania jonizującego w diagnostyce i leczeniu należy prawidłowo uzasadnić użycie danej procedury, przede wszystkim mając na uwadze bezpieczeństwo pacjenta. Na nadmierną ekspozycję na promieniowanie jonizujące podczas badań diagnostycznych, zabiegów czy terapii mogą być narażeni zarówno pacjenci, jak i personel medyczny. Powyższe zagadnienie omówiono w licznych badaniach, po przeprowadzeniu których postulowano stosowanie właściwych środków zapobiegających nadmiernemu narażeniu na skutki promieniowania. Wśród środków ochrony wymieniane są osłony ołowiane, gogle ze szkłem ołowiowym, zastosowanie kolimatorów wiązki promieniowania i zachowanie właściwego dystansu od źródeł promieniowania.¹⁻² U pacjentów poddawanych działaniu promieniowania jonizującego, jak i wśród personelu medycznego często występują wady układu wzrokowego korygowane przez noszenie przez nich soczewek kontaktowych. W badaniu Mozolewskiej-Piotrowskiej et al. stwierdzono występowanie ametropii u 51% studentów kierunku lekarskiego i 47% dentystycznego. Najczęściej występującą wadą wzroku była krótkowzroczność.³

Podstawowe parametry soczewek kontaktowych

Materiały stosowane do produkcji soczewek kontaktowych są biokompatybilne dla organizmu, co oznacza, że nie wywołują reakcji biologicznych ze strony tkanek oka (są dobrze tolerowane). Nie powodują nadmiernego parowania łez oraz osadzania się na nich złogów. Przykładowym biokompatybilnym materiałem używanym do produkcji soczewek kontaktowych może być fosforylocholina – składnik błony komórkowej erytrocytów.⁴

Soczewki kontaktowe są opisywane na podstawie różnych parametrów. Jedne z najistotniejszych to te, które są związane z możliwością transportu tlenu przez soczewkę kontaktową do rogówki. Warto wspomnieć, że początkowo soczewki wykonywane były z nieprzepuszczalnego dla gazów polimetakrylanu metylu (PMMA). Dopiero później do produkcji zostały wprowadzone materiały gazoprzepuszczalne miękkie (hydrożelowe i silikonowo-hydrożelowe) oraz sztywne. Prace nad wpływem dostępności tlenu do rogówki są prowadzone od kilkadziesiąt lat. Już podczas pierwszych z nich opisano negatywny wpływ środowiska anaerobowego na właściwości optyczne rogówki, a nowsze badania dostarczają coraz dokładniejszych danych o zjawiskach związanych z hipoksją rogówki.

W swoim opracowaniu Leung et al. przedstawili spójne ilościowe wyjaśnienie powstawania obrzęku rogówki w przypadku niewystarczającego dopływu tlenu – jego niedobór zwiększa wydzielanie mleczanów, których zwiększone stężenie powoduje wzrost osmolarności na styku śródbłonna i istoty właściwej rogówki w stosunku do warunków właściwego utlenowania i osłabienie działania aktywnej pompy elektrolitowej zależnej od osmolarności.⁵

Niewystarczające zaopatrzenie rogówki w tlen jest określane jako hipoksja. Stan ten może prowadzić do zmian w metabolizmie rogówki, obrzęku, przymglenia rogówki, zaburzeń w obrębie jej nabłonka i śródbłonna. Przedłużające się niewystarczające zaopatrzenie rogówki w tlen prowadzi do powstania mikrocyst, przekrwienia okołorąbkowego, neowaskularyzacji, a nawet przesunięcia refrakcji w stronę krótkowzroczności.⁶

W odniesieniu do soczewek kontaktowych używa się parametru Dk (tlenoprzepuszczalność), gdzie D oznacza współczynnik dyfuzji, a k rozpuszczalność tlenu w materiale soczewki kontaktowej. W ten sposób charakteryzuje się materiał soczewki o jednostkowej grubości. Aby uzyskać informację o soczewce o danej mocy, wprowadza się parametr Dk/t , czyli tlenotransmisyjność, gdzie t to grubość soczewki.⁷ Wprowadzenie materiałów o wysokim Dk spowodowało znaczne zmniejszenie opisywanych powyżej negatywnych zjawisk związanych z ograniczeniem

dostępności tlenu do rogówki.⁸ Oprócz powyższych parametrów stosowane są też inne, np. ekwiwalent procentowy tlenu, który ma określać stężenie tlenu pod soczewką kontaktową, i strumień przepływu tlenu określający rzeczywistą ilość tlenu dostępnego dla rogówki.⁴

Poza wskaźnikami związanymi z przepuszczalnością tlenu soczewki kontaktowe są też opisywane takimi parametrami, jak zwilżalność powierzchni, moduł sztywności, uwodnienie, jonowość, kształt krawędzi, system stabilizacji (w przypadku soczewki torycznej). Podkreślenia wymaga fakt, że w soczewkach hydrożelowych przepuszczalność tlenu zwiększa się wraz ze stopniem uwodnienia materiału, natomiast w soczewkach silikonowo-hydrożelowych parametry te nie są od siebie tak zależne – tlenoprzepuszczalność zależy głównie od rodzaju użytego silikonu.

Podczas profesjonalnego doboru soczewki kontaktowej niezbędne jest też określenie właściwej średnicy i krzywizny soczewki, aby umożliwić jej wygodne i bezpieczne użytkowanie. Ostatecznie bezpieczeństwo i komfort użytkowania soczewki zależy od jej interakcji w konkretnych warunkach biologiczno-medycznych, mechanicznych i środowisku zewnętrznym.

Badanie wolnych objętości w soczewkach kontaktowych

Mając na uwadze negatywny wpływ promieniowania jonizującego, należy przyjąć hipotezę, że w soczewkach kontaktowych poddanych jego działaniu mogą zachodzić zmiany w obrębie ich wewnętrznej struktury, które mogą wpływać na uwodnienie i upośledzenie transportu tlenu do komórek rogówki.

W badaniach struktury i właściwości materiałów polimerowych wykorzystywanych do produkcji soczewek kontaktowych szerokie zastosowanie znalazły metody spektroskopowe, takie jak spektroskopia czasów życia anihilujących pozytonów (ang. *positron annihilation lifetime spectroscopy* – PALS), spektroskopia Ramana oraz spektroskopia w średniej podczerwieni (ang. *mid-infrared spectroscopy* – MIR).

Dotychczasowe badania z wykorzystaniem powyższych metod przeprowadzono na silikonowo-hydrożelowych i hydrożelowych soczewkach kontaktowych poddawanych działaniu promieniowania jonizującego w warunkach laboratoryjnych i użytkowaniu w czasie. Grupę kontrolną stanowiły soczewki kontaktowe fabrycznie nowe.

Spektroskopia PAL jest niezwykle czułą metodą umożliwiającą charakteryzowanie właściwości strukturalnych, takich jak defekty i swobodne objętości oraz pozwalającą na określenie ich korelacji ze współczynnikiem przepuszczalności tlenu.^{9–11}

Technika PALS opiera się na zjawisku anihilacji pozytonów. Czas życia pozytonu jest uwarunkowany środowiskiem, w którym się znajduje. W próżni czas ten jest praktycznie nieskończony, natomiast w materii jest ograni-

czony momentem spotkania elektronu i zazwyczaj nie jest dłuższy od kilkudziesięciu nanosekund. W wyniku anihilacji pary pozyton–elektron masa tych cząstek jest zamieniana w równoważną energię promieniowania elektromagnetycznego. Z największym prawdopodobieństwem następuje emisja parzystej (2γ) lub nieparzystej (3γ) liczb kwantów gamma. Jak w każdym procesie fizycznym spełnione są prawa zachowania pędu, momentu pędu, energii, ładunku i parzystości. W związku z tym badanie fotonów powstałych w wyniku procesu anihilacji dostarcza informacji o stanie anihilującej pary pozyton–elektron. W przypadku materiałów amorficznych może dochodzić do tworzenia się stanu związanego elektronu i pozytonu, tzw. pozytu (Ps). Pozyt może występować w dwóch stanach spinowych – singletowym jako *para*-pozyt (*p*-Ps) z antyrównoległym ułożeniem spinów pozytonu i elektronu lub trypletowym jako *orto*-pozyt (*o*-Ps) z równoległą orientacją spinów. Prawdopodobieństwo powstania *o*-Ps trzykrotnie przewyższa prawdopodobieństwo powstania *p*-Ps. Pozyt jest układem nietrwałym. W próżni *p*-Ps anihiluje do 2 kwantów gamma po czasie ok. 0,125 ns, natomiast *o*-Ps do 3 kwantów gamma po czasie ok. 142 ns.^{12–13} W ośrodkach materialnych czas życia *o*-Ps jest znacznie krótszy (kilka nanosekund) i zależny od upakowania struktury wewnętrznej. Skrócenie czasu życia *o*-Ps jest konsekwencją procesu gaszenia, tzw. *pick-off*, dzięki któremu anihilacja następuje do 2 kwantów gamma. Ze względu na krótki czas życia *p*-Ps proces *pick-off* dotyczy głównie *o*-Ps.^{13–16}

Zależność pomiędzy czasem życia *o*-Ps a rozmiarem wolnej objętości jest określana na podstawie modelu Tao-Eldrupa:^{15–16}

$$\tau_3 = 0.5 \left[1 + \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1}$$

gdzie:

τ_3 – średni czas życia *o*-Ps [ns],

R – średni promień objętości swobodnej [nm],

ΔR – empiryczna stała dopasowania.

Równanie to stanowi podstawę do obliczania średniego rozmiaru i koncentracji swobodnych objętości.¹³

Spektroskopia Ramana i MIR dostarczają informacji o budowie chemicznej związków poprzez identyfikację drgań charakteryzujących dane grupy funkcyjne oraz analizę widm w zakresie tzw. *fingerprint*. Metoda MIR wykorzystuje zjawisko absorpcji promieniowania przez molekuły badanego materiału w zakresie podczerwieni, dzięki czemu uzyskuje się widma z pasmami absorpcyjnymi przypisane odpowiednim grupom funkcyjnym, natomiast metoda Ramana opiera swoje działanie na zjawisku rozpraszania monochromatycznego promieniowania laserowego na atomach badanego materiału, przez co uzyskuje się widma zawierające pasma odpowiadające poziomom oscylacyjnym molekuł struktury materiału.¹⁷

Należy zaznaczyć, że w przypadku materiałów polimerowych wykorzystywanych do produkcji soczewek kontaktowych, będących mieszaninami różnych monomerów o nieznanym proporcjach (prawo patentowe), wiele pasm może się na siebie nakładać, znacznie utrudniając analizę i interpretację.

Badania za pomocą PALS wykazały, że rozmiary oraz ilości swobodnych objętości w badanych soczewkach kontaktowych znacznie różnią się między sobą. Największe rozmiary i ilości wolnych objętości obserwuje się w soczewkach silikonowo-hydrożelowych. Są one ściśle związane z przepuszczalnością tlenu – im większe rozmiary i ilości swobodnych objętości, tym większy współczynnik przepuszczalności tlenu.

W materiałach hydrożelowych w stanie uwodnionym wszystkie wolne przestrzenie wypełnione są wodą, tzw. wodą wolną.^{13,18} Woda wolna jest odpowiedzialna za przenikanie tlenu,^{19,20} a jej zawartość zależy od rozmiarów i ilości wolnych objętości. Wprowadzenie grup siloksanowych powoduje zwiększenie porowatości materiału. Wiązania Si–O charakteryzują się wysoką elastycznością i mobilnością.^{21,22} Giętkość łańcucha siloksanowy zawdzięczają względnie długim wiązaniom Si–O (ok. 1,64 Å) i Si–C (ok. 1,88 Å) minimalizującym utrudnienie rotacji wokół wiązań łańcucha oraz przemiennemu rozmieszczeniu atomów Si oraz O.²³ Istnieje możliwość tworzenia kanałów – swobodnych objętości – umożliwiających transport gazów poprzez matrycę polimerową. Wysoki współczynnik przepuszczalności tlenu dla soczewek silikonowo-hydrożelowych można więc interpretować jako większe rozmiary wolnych objętości oraz ich ilości. Ilość silikonu w monomerach oraz proporcja samych monomerów w materiale odgrywają kluczową rolę.

Ewentualna zmiana rozmiarów i ilości wolnych objętości w strukturze materiału wynikająca z oddziaływania promieniowania jonizującego może wpłynąć na zmianę parametru przepuszczalności tlenu i bezpieczeństwo użytkowników soczewek kontaktowych.¹⁸

Możliwe powikłania związane z użytkowaniem soczewek kontaktowych

Mimo zachowania należytej staranności podczas doboru soczewek kontaktowych i właściwego ich użytkowania może dojść do powikłań. Efekty uboczne mogą występować na powiekach, spojówkach i rogówce. Wśród objawów niepożądanych dotyczących powiek wymienić można niepełne mruganie, opadnięcie powieki, zapalenie brzegów powiek, niewydolność gruczołów Meiboma czy jęczmień. Powikłania dotyczące spojówek to np. przekrwienia czy też nadwrażliwość – olbrzymiobrodawkowe zapalenie spojówek. Na rogówce mogą wystąpić liczne stany związane z ubytkami komórek nabłonka określane w testach barwienia, m.in. barwienie na godzinie 3 i 9,

barwienie nabłonka łukowate górne czy dolne. Czasem w nabłonku rogówki można też zaobserwować cysty i wakuole oraz obrzęk. W przypadku istoty właściwej rogówki może pojawić się jej obrzęk, przymglenie lub neowaskularyzacja. Zmiany związane ze stosowaniem soczewek kontaktowych mogą prowadzić do zmiany kształtu i liczby komórek śródbłonka rogówki. Specjalnego podkreślenia wymaga fakt, że w przebiegu użytkowania soczewek kontaktowych może dojść do zapalenia rogówki (*keratitis*).²⁴

Keratitis jest stanem, który może prowadzić do trwałego upośledzenia ostrości wzroku. Zapalenie rogówki może być jałowe (lepsze rokowanie) bądź związane z infekcją – bakteryjną, pełzakową lub grzybiczą. Przyjmuje się, że typowe dla stosowania soczewek kontaktowych jest infekcyjne pełzakowe zapalenie rogówki wywołane przez *Acanthamoeba*, które jest stanem bezpośrednio zagrażającym widzeniu. Jako istotny czynnik ryzyka rozwoju tego zapalenia wymienia się także brak stosowania się do zaleceń producentów poszczególnych rodzajów soczewek.^{24,25}

Podsumowanie

Jednym z możliwych powikłań związanych ze stosowaniem soczewek kontaktowych jest niedotlenienie rogówki. Ryzyko niedotlenienia rogówki wzrasta przy użytkowaniu soczewek kontaktowych znacznie ograniczających dostęp tlenu do rogówki (o niskim Dk/t). Wrażliwość rogówek na niedotlenienie jest jednak bardzo zróżnicowana. Niedotlenienie rogówki powoduje, że zachodzą w niej zmiany metaboliczne zmniejszające skuteczność działania mechanizmów obronnych oka. Skutkiem tego może być zwiększona podatność na infekcję, w tym bakteryjne, grzybicze czy pierwotniakowe. Najbardziej zagrożoną niedotlenieniem częścią jest jej centrum.

Analiza wpływu czynników zewnętrznych, w tym promieniowania jonizującego, na zmianę parametru tlenu-przepuszczalności wydaje się ważna w kontekście bezpieczeństwa użytkowników soczewek.

Przedstawione powyżej dane wskazują, że istnieje konieczność wykonania niezależnych od producentów badań dotyczących struktury materiałów soczewek kontaktowych różnego typu w celu określenia ich tolerancji na działanie promieniowania jonizującego i tym samym zagwarantowania bezpieczeństwa ich użytkownikom narażonym na kontakt z promieniowaniem jonizującym (zarówno pacjentom, jak i personelowi medycznemu).

Piśmiennictwo

1. Hubbe U, Sircar R, Scheiwe C, et al. Surgeon, staff, and patient radiation exposure in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: Impact of 3D fluoroscopy-based navigation partially replacing conventional fluoroscopy: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*. 2015;16:142. doi: 10.1186/s13063-015-0690-5.
2. Klingler J, Sircar R, Scheiwe C, et al. Comparative study of C-arms for intraoperative 3-dimensional imaging and navigation in minimally invasive spine surgery. Part II – radiation exposure. *Clin Spine Surg*. 2017;30:669–676.

3. Mozolewska-Piotrowska K, Stepniewska J, Nawrocka J. Występowanie krótkowzroczności szkolnej u studentów medycyny. *Klin Oczna*. 2005;107:468–470.
4. Gasson A, Morris JA. *Soczewki kontaktowe – praktyczny przewodnik właściwego dopasowania*. Ścibior R, red. wyd. pol. Wrocław: Elsevier Urban & Partner; 2014.
5. Leung BK, Bonanno JA, Radke CJ. Oxygen-deficient metabolism and corneal edema. *Prog Retin Eye Res*. 2011;30(6):471–492.
6. Harvitt DM, Bonanno JA. Re-evaluation of the oxygen diffusion model for predicting minimum contact lens Dk/t values needed to avoid corneal anoxia. *Optom Vision Sci*. 1999;76:712–719.
7. Chhabra M, Prausnitz JM, Radke CJ. A single-lens polarographic measurement of oxygen permeability (Dk) for hypertransmissible soft contact lenses. *Biomaterials*. 2007;28(30):4331–4342.
8. Fonn D, Sweeney DF, Holden BA, Cavanagh D. Corneal oxygen deficiency. *Eye Contact Lens*. 2005;31(1):23–27.
9. Filipecka K, Budaj M, Chamerski K, et al. PALS, MIR and UV-vis-NIR spectroscopy studies of pHEMA hydrogel, silicon- and fluoro-containing contact lens materials. *J Mol Struct*. 2017;1148:521–530.
10. Singh JJ, Eftekhari A, Upchurch BT, Burns KS. An investigation on microstructural characteristics of contact lens polymers. *NASA Technical Paper*. 1990:3034.
11. Sane P, Tumisto F, Holopainen JM. Void volume variations in contact lens polymers. *Cont Lens Anterior Eye*. 2011;34(1):2–6.
12. Dryzek J. *Wstęp do spektroskopii anihilacji pozytonów w ciele stałym*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego; 1997.
13. Filipecki J, Kocela A, Korzekwa P, et al. Structural study of polymer hydrogel contact lenses by means of positron annihilation lifetime spectroscopy and UV-vis-NIR methods. *J Mater Sci Mater Med*. 2013;24:1837–1842.
14. Chamerski K. Analiza porównawcza struktury wewnętrznej implantów hydrofilowych oraz hydrofobowych stosowanych w chirurgii okulistycznej metodą spektroskopii czasów życia pozytonów. *Technical Issues*. 2015;3:3–10.
15. Liao KS, Chen H, Awad S, et al. Determination of free-volume properties in polymers without orthopositronium components in positron annihilation lifetime spectroscopy. *Macromolecules*. 2011;44:6818–6826.
16. Jean YC, Van Horn JD, Hung WS, Lee KR. Perspective of positron annihilation spectroscopy in polymers. *Macromolecules*. 2013; 46:7133–7145.
17. Kęcki Z. *Podstawy spektroskopii molekularnej*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2013.
18. Filipecki J, Korzekwa P, Filipecka K, et al. Badanie zmian wolnych objętości w strukturze polimerowych dwuogniskowych soczewek kontaktowych metodą anihilacji pozytonów. *Polim Med*. 2010;40(4):27–33.
19. Hoffman AS. Hydrogels for biomedical applications. *Adv Drug Deliv Rev*. 2012;64:18–23.
20. Tranoudis I, Efron N. Water properties of soft contact lens materials. *Cont Lens Anterior Eye*. 2004;27(4):193–208.
21. Reddy BSR, Senthilkumar U. Prospects of siloxane membrane technology for gas separation. *J Sci Ind Res*. 2003;62(7):666–677.
22. Zhao Z, Xie H, An S, Jiang Y. The Relationship between oxygen permeability and phase separation morphology of the multicomponent silicone hydrogels. *J Phys Chem B*. 2014;118(50):14640–14647.
23. Cypriak M, Delczyk B, Pospiech P, Strzelec K. Modyfikacje polimerów siloksanowych. *Polimery*. 2007;52:496–502.
24. Efron N. *Contact Lens Complications*. 3rd ed. Philadelphia: Saunders; 2012.
25. Ibrahim YW, Boase DL, Cree IA. How could contact lens wearers be at risk of *Acanthamoeba* infection? A Review. *Journal Optom*. 2009;2(2):60–66.

