

# ROLA STĘŻENIOWYCH WARSTW GRANICZNYCH W KREACJI ELEKTRYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI WZMACNIAJĄCYCH KOMÓRKI ZAWIERAJĄCE DWIE MEMBRANY POLIMEROWE I TERNARNE ROZTWORY ELEKTROLITYCZNE

HANNA WERNER, ANDRZEJ ŚLĘZAK

Katedra Biomedycznych Podstaw Kultury Fizycznej, Politechnika Częstochowska

---

## Streszczenie

Celem pracy było zbadanie efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, składającej się z dwóch układów 1-membranowych połączonych równolegle, w których membrany były ustawione w płaszczyznach horyzontalnych i zawierającej trójskładnikowe roztwory elektrolityczne. Ponadto zbadano wzmacnianie efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych. Materiałem badawczym była płaska, symetryczna i porowata membrana z octanu celulozy, stosowana w hemodializatorze zwojowym oraz roztwory chlorku sodu w wodnym roztworze etanolu o stałym stężeniu i roztwory etanolu w wodnym roztworze chlorku sodu o stałym stężeniu.

Badania elektrycznych napięć membranowych  $\psi_o$  i  $\psi_s$ , przeprowadzono w dwóch izotermicznych etapach. W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę  $\psi_o(t)$  w warunkach, w których membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach wertykalnych. W drugim etapie wyznaczano charakterystykę  $\psi_s(t)$  w sytuacji, w której membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych. We wszystkich etapach monitoring elektrycznych napięć membranowych prowadzono aż do uzyskania stanu stacjonarnego.

Otrzymane rezultaty pokazały, że  $\Psi_s = \psi_s - \psi_o$  jest nieliniową funkcją stężeń ( $C_{ms}/C_o$ ) roztworów, znajdujących się w przedziałach środkowym ( $C_{ms}$ ) i zewnętrznym ( $C_o$ ) 2-membranowej komórki dyfuzyjnej. Stwierdzono, że owa komórka posiada właściwość wzmacniania napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych. Miarą tych właściwości

jest odpowiedni współczynnik wzmacniania. Wartość tego efektu zależy od składu i stężenia roztworów oraz konfiguracji 2-membranowej komórki dyfuzyjnej.

**Słowa kluczowe:** transport membranowy, membrana polimerowa, potencjał membranowy, współczynnik wzmocnienia, dyfuzja

---

## **ROLE OF CONCENTRATION BOUNDARY LAYERS IN CREATION OF THE ELECTRICAL AMPLIFICATION PROPERTIES OF CELL CONTAINING TWO POLYMERIC MEMBRANES AND TERNARY ELECTROLYTE SOLUTIONS**

### **Summary**

The aim of this work was to investigate the effect of concentration boundary layers upon electrical properties of a 2-membrane diffusive cell, consisting of two 1-membrane systems connected parallel, in which the membranes were fixed in horizontal planes and containing ternary electrolyte solutions. Besides, the amplification of the voltage effect of concentration boundary layers was studied. The research material consisted of flat, symmetrical and porous membrane of regenerated cellulose applied in the coil hemodialyzer and sodium chloride in aqueous ethanol solution or ethanol in aqueous sodium chloride solution.

The studying of membrane electric voltages  $\psi_o$  and  $\psi_s$  were carried out in the series of two isothermal stages. In the first stage was established the  $\psi_o(t)$  characteristic in the conditions in which membranes  $M_l$  i  $M_r$  were fixed vertically. In the second stage the  $\psi_s(t)$  characteristic was established in the situation in which  $M_l$  and  $M_r$  membranes were fixed horizontally. In all stages the monitoring of membrane electrical voltages was carried out until the stationary state was achieved.

The obtained results shows, that  $\Psi_s = \psi_s - \psi_o$  is the non-linear function of concentrations ( $C_{ms}/C_o$ ) of the solutions being in the ranges both central ( $C_{ms}$ ) and external ( $C_o$ ) in a double-membrane diffusive cell. It has been stated that this cell has the properties of amplification the voltage effect of the concentration boundary layers. The measure of these properties is an

adequate amplification coefficient. The value of this effect depends on the composition and the concentration of the solutions and the configuration of double-membrane diffusive cell.

**Key words:** membrane transport, polymeric membrane, membrane potential, amplification coefficient, diffusion

---

## WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych osiągnięć termodynamiki nierównowagowej XX wieku, było jej zastosowanie do opisu transportu membranowego zarówno biernego jak i aktywnego. Przykładem osiągnięć aplikacyjnych jest opracowany przez Currana i McIntosha model błony podwójnej, który objaśnia biofizyczne aspekty transportu wody zarówno w układach biologicznych jak i sztucznych [1]. Ów model wymaga istnienia dwu błon o różnych parametrach przenikania, ułożonych w serię i rozdzielających roztwory o różnych stężeniach. Stwierdzono, że w tym układzie możliwy jest transport zgodny z gradientem stężenia, transport izoosmotyczny, a także bierny transport wbrew gradientowi stężenia. Ponadto ów układ 2-membranowy, wykazuje charakterystyczne dla układów biologicznych właściwości prostownicze (asymetria strumieni: objętościowego, substancji rozpuszczonej i wody, ciśnienia hydromechanicznego oraz asymetria charakterystyk prądowo napięciowych) [2-4]. Opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu prace świadczą o tym, że model błony podwójnej Currana-McIntosha przeżywa drugą młodość [5, 6].

Z dotychczasowych badań [2, 7-10] wynika, że układ 2-membranowy możemy potraktować jako szeregowe połączenie dwóch układów 1-membranowych, w których membrany są ustawione w płaszczyznach horyzontalnych lub wertykalnych, a roztwory rozdzielane przez membrany spełniają warunek  $C_l > C_m > C_r$  lub jako równoległe połączenie dwóch układów 1-membranowych, w których membrany są ustawione w płaszczyznach horyzontalnych, a roztwory rozdzielane przez membrany spełniają warunek  $C_l < C_m < C_r$ . Jeśli roztwory rozdzielane przez membrany są pozbawione mieszania mechanicznego, każda z membran tworzących 2-membranową komórkę osmotyczno-dyfuzyjną ulega polaryzacji stężeniowej, polegającej na wytworzeniu po obydwu jej stronach stężeniowych warstw granicznych. Badania nad biernym osmotycznym i dyfuzyjnym transportem membranowym w układach zarówno 1- jak i 2-membranowych wykazały, że siła grawitacji jest jednym z

czynników znacząco wpływających na procesy owego transportu. Wpływ ten zachodzi, poprzez oddziaływanie na stan uformowanych po obydwu stronach membrany lub membran w warunkach mikrogravitacji stężeniowych warstw granicznych. Przez stan mikrogravitacji rozumiemy stan, w którym siła grawitacji jest zrównoważona przez odśrodkową siłę bezwładności lub przez siłę wyporu hydrostatycznego. Wpływ pola grawitacyjnego na procesy biernego transportu w 2-membranowej komórce osmotyczno-dyfuzyjnej, przejawia się w postaci efektów grawiosmotycznych, grawidyfuzyjnych i grawielektrycznych [7, 11-17].

Celem poprzedniej pracy [18] było określenie wpływu stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, składającej się z dwóch układów 1-membranowych połączonych równolegle, w których membrany były ustawione w płaszczyznach horyzontalnych. Zbadano efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, zawierającej dwuskładnikowe roztwory elektrolityczne. Materiałem badawczym były płaska i symetryczna membrana z octanu celulozy, stosowana w hemodializatorze zwojowym oraz wodne roztwory chlorku sodu. Badania elektrycznych napięć membranowych  $\psi_o$  i  $\psi_s$  odbywały się w trzech etapach. W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę  $\psi_o(t)$  w warunkach, w których membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach wertykalnych. W drugim etapie wyznaczano charakterystykę  $\psi_s(t)$  w sytuacji, w której membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych. Trzeci etap był identyczny jak pierwszy. We wszystkich etapach pomiar elektrycznych napięć membranowych, prowadzono aż do uzyskania stanu stacjonarnego (nasylenia).

W sytuacji gdy membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach wertykalnych, całkowite elektryczne napięcie membranowe  $\psi_o$  zmierzone przy pomocy elektrod  $E_1$  i  $E_2$  było wypadkową: napięcia elektrodowego  $\psi_1$  (na elektrodzie  $E_1$ ), spadku potencjału  $\psi_1^o$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_l^o$ , napięcia membranowego ( $\psi_{Mo}^l$ ), spadku potencjału  $\psi_{lm}^o$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_{lm}^o$ , spadku potencjału  $\psi_{rm}^o$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_{rm}^o$ , napięcia membranowego ( $\psi_{Mo}^r$ ), spadku potencjału  $\psi_r^o$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_r^o$  oraz napięcia elektrodowego  $\psi_2$  (na elektrodzie  $E_2$ ):

$$\psi_o = \psi_1 + \psi_l^o + \psi_{Mo}^l + \psi_{lm}^o + \psi_{rm}^o + \psi_{Mo}^r + \psi_r^o + \psi_2 \quad (1)$$

W sytuacji, gdy membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych, całkowite elektryczne napięcie membranowe  $\psi_s$  zmierzone na elektrodach  $E_1$  i  $E_2$  było wypadkową: napięcia elektrodowego  $\psi_1$  (na elektrodzie  $E_1$ ), spadku potencjału  $\psi_l$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_l$ , napięcia membranowego ( $\psi_M^l$ ), spadku potencjału  $\psi_{lm}$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_{lm}$ , spadku potencjału  $\psi_{rm}$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_{rm}$ , napięcia membranowego ( $\psi_M^r$ ), spadku potencjału  $\psi_r$  w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną  $l_r$  oraz napięcia elektrodowego  $\psi_2$  (na elektrodzie  $E_2$ ):

$$\psi_s = \psi_1 + \psi_l + \psi_M^l + \psi_{lm} + \psi_{rm} + \psi_M^r + \psi_r + \psi_2 \quad (2)$$

Różnicę elektrycznych napięć membranowych  $\psi_s$  i  $\psi_o$  nazwano *efektem napięciowym stężeniowych warstw granicznych* i oznaczono symbolem  $\Psi_s$

$$\Psi_s = \psi_s - \psi_o \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę wartości  $\psi_s(t)$  oraz  $\psi_o(t)$  w stanie stacjonarnym, obliczono efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_s$ ) dla różnych stężeń roztworów, tych samych substancji w przedziale międzymembranowym 2-membranowej komórki dyfuzyjnej i sporządzono zależności  $\Psi_s(C_s)$ . Celem obecnej pracy jest zbadanie efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, zawierającej trójskładnikowe roztwory elektrolitowe oraz zbadanie zjawiska wzmacniania efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych.

## MATERIAŁ I METODY

Materiałem badawczym były płaska i symetryczna membrana z octanu celulozy o nazwie *Ultra Flo 145 Dialyzer*, stosowana w hemodializatorze zwojowym oraz roztwory trójskładnikowe, tj. roztwory chlorku sodu w wodnym roztworze etanolu o stałym stężeniu i roztwory etanolu w wodnym roztworze chlorku sodu o stałym stężeniu. W stanie uwodnionym grubość membrany *Ultra Flo 145 Dialyzer* wynosiła około 800  $\mu\text{m}$ . Badania wpływu stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, przeprowadzono za pomocą typowego zestawu pomiarowego opisanego w poprzednich pracach [18, 19]. Ów zestaw składał się z 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, dwóch zewnętrznych odwracalnych elektrod chlorosrebrowych ( $E_1$  i  $E_2$ ), elektrometru i rejestratora. 2-membranowa komórka elektrochemiczna składała się z trzech

cyldrycznych naczyń  $l$ ,  $m$  oraz  $r$  rozdzielonych membranami  $M_l$  i  $M_r$ , o powierzchni  $3,36 \text{ cm}^2$  każda. Pojemność naczyń  $l$ ,  $m$  oraz  $r$  była jednakowa i wynosiła  $300 \text{ cm}^3$ . Naczynia zewnętrzne ( $l$  oraz  $r$ ) we wszystkich eksperymentach zawierały wodne roztwory NaCl o stężeniu  $C_l=C_r=C_o=10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ . Naczynie  $m$  wypełniano badanym roztworem trójskładnikowym. Do naczyń  $l$  oraz  $r$  dołączono rezerwuary (N), zawierające wodny roztwór NaCl o stężeniu  $C_o=10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  oraz umieszczono elektrody Ag/AgCl ( $E_1$  i  $E_2$ ).

Opis konstrukcji elektrod pomiarowych przedstawiono w poprzednich pracach [18, 19]. Końcówki elektrod  $E_1$  i  $E_2$  podłączono do naczyń  $l$  oraz  $r$  w odległości około  $1,5 \text{ cm}$  odpowiednio od membrany  $M_l$  i  $M_r$ . We wszystkich eksperymentach elektrody  $E_1$  i  $E_2$  były ustawione pionowo. Nie stosowano mieszania mechanicznego roztworów. 2-membranowa komórka dyfuzyjna, elektrody  $E_1$  i  $E_2$  były umieszczone w termostatowanej i uziemionej osłonie elektrostatycznej. Pomiary przeprowadzono w stałej temperaturze  $T=(295\pm 0,1) \text{ K}$ .

Badania elektrycznych napięć membranowych  $\psi_o$  i  $\psi_s$ , przeprowadzono w serii niezależnych eksperymentów, według następującej procedury pomiarowej. W pierwszym etapie, wyznaczono charakterystykę  $\psi_o(t)$  w warunkach, w których membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach wertykalnych. W drugim etapie, wyznaczano charakterystykę  $\psi_s(t)$  w sytuacji, w której membrany  $M_l$  i  $M_r$  ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych. Trzeci etap był identyczny jak pierwszy. We wszystkich etapach pomiar elektrycznych napięć membranowych prowadzono aż do uzyskania stanu stacjonarnego (nasycenia). Biorąc pod uwagę wartości  $\psi_s(t)$  oraz  $\psi_o(t)$  w stanie stacjonarnym, obliczono na podstawie równania (3), efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_s$ ), dla różnych stężeń roztworów tych samych substancji w przedziale międzymembranowym ( $m$ ) 2-membranowej komórki dyfuzyjnej i sporządzono zależności  $\Psi_s(C_s)$ .

Wyznaczone doświadczalnie wartości gęstości ( $\rho$ ), lepkości kinematycznej ( $\nu$ ) owych roztworów zostały przedstawione w pracy [20]. Z badań tych wynika, że gęstość wodnych roztworów etanolu jak i roztworów etanolu w wodnym roztworze chlorku sodu o stałym stężeniu, maleje liniowo ze wzrostem stężenia etanolu. Z kolei gęstość wodnych roztworów chlorku sodu jak i roztworów chlorku sodu w wodnym roztworze etanolu rośnie liniowo ze wzrostem stężenia chlorku sodu. Należy zaznaczyć, że w przeciwieństwie do omawianych roztworów dwuskładnikowych, gęstość roztworów trójskładnikowych, może być mniejsza, równa lub większa od gęstości rozpuszczalnika.

Wartości parametrów przenikania owych membran, tj. współczynników: przepuszczalności hydraulicznej ( $L_p$ ), odbicia ( $\sigma_s$ ) i przepuszczalności dyfuzyjnej ( $\omega_s$ ) dla wodnych roztworów chlorku sodu lub etanolu zestawiono w tabeli 1. Z tabeli tej wynika, że badana membrana jest selektywna zarówno w stosunku do chlorku sodu jak i etanolu ( $0 < \sigma_s < 1$ ,  $0 < \sigma_s^i < 1$ ,  $s=1,2$ ;  $i=A, B$ ), ale lepiej przepuszcza cząsteczki wody (duża wartość współczynnika  $L_p$ ) niż cząsteczki substancji rozpuszczonych (duża wartość współczynników  $\omega_{ks}$  oraz mała wartość współczynników  $\sigma_s$  i  $\sigma_s^i$ ). Ponadto owa membrana ulega stosunkowo silnej polaryzacji stężeniowej, z powodu tworzenia się po jej obydwu stronach stężeniowych warstw granicznych. Miarą polaryzacji stężeniowej jest współczynnik polaryzacji stężeniowej  $\zeta_s^i = \Omega_s^i \omega_s^{-1}$  ( $s=1,2$ ;  $i=A,B$ ), który ma sens względnego współczynnika przepuszczalności dyfuzyjnej kompleksu: warstwa graniczna/membrana/warstwa graniczna i membrany.

Z badań doświadczalnych przedstawionych w pracy [20] wynika, że wartość współczynników  $\zeta_s^i$  dla roztworów trójskładnikowych składających się z chlorku sodu i etanolu, zależy od stężenia jednego ze składników roztworu przy ustalonym stężeniu składnika drugiego. W związku z tym w tabeli 2 zestawiono wartości współczynników  $\zeta_1^A$  oraz  $\zeta_1^B$ , oszacowanych na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [20] dla stężeń roztworów chlorku sodu i etanolu wykorzystywanych w niniejszej pracy.

Z tabeli 2 wynika, że dla membrany *Ultra Flo 145 Dialyzer*, wartości współczynnika  $\zeta_1^A$  maleją niemonotonicznie od wartości maksymalnej równej około  $\zeta_1^A=0,52$  do wartości minimalnej równej około  $\zeta_1^A=0,08$  osiąganey dla  $C_1=10^{-2}$  mol  $\text{l}^{-1}$ . Z kolei wartości współczynnika  $\zeta_1^B$  rosną niemonotonicznie od wartości minimalnej równej około  $\zeta_1^B=0,08$  do wartości maksymalnej, równej około  $\zeta_1^B=0,5$  osiąganey dla  $C_1=14 \times 10^{-3}$  mol  $\cdot \text{l}^{-1}$ . Z kolei wartości współczynnika  $\zeta_2^A$  maleją niemonotonicznie od wartości maksymalnej równej około  $\zeta_2^A=0,52$ , do wartości minimalnej równej około  $\zeta_2^A=0,08$  osiąganey dla  $C_2=6 \times 10^{-3}$  mol  $\cdot \text{l}^{-1}$ . Z kolei wartości współczynnika  $\zeta_2^B$  rosną niemonotonicznie od wartości minimalnej równej około  $\zeta_2^B=0,08$ , do wartości maksymalnej równej około  $\zeta_2^B=0,5$  osiąganey dla  $C_2=8 \times 10^{-3}$  mol  $\cdot \text{l}^{-1}$ .

## WYNIKI I DYSKUSJA

Na rycinie 1 przedstawiono zależności efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_1$ ) od stosunku stężeń NaCl ( $C_{m1}/C_o$ ), przy ustalonym stężeniu etanolu ( $C_{m2}$ ). Wykres 1 otrzymano dla roztworów dwuskładnikowych ( $C_{m2}=0 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ), wykresy 2 i 3 – dla roztworów trójskładnikowych. W przypadku wykresu 2 stężenie etanolu wynosiło  $C_{m2}=0,005 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ , oraz  $C_{m2}=0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  – w przypadku wykresu 3. Z wykresu 1 wynika, że wraz ze wzrostem wartości  $C_{m1}/C_o$ ,  $\Psi_1$  rośnie parabolicznie i dla  $C_{m1}/C_o=30$  osiąga wartość maksymalną  $\Psi_1 = 25 \text{ mV}$ . Dla  $C_{m1}/C_o > 30$ ,  $\Psi_1$  maleje w przybliżeniu liniowo. Dla roztworów dwuskładnikowych efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_1$ ) jest dodatni w całym zakresie badanych  $C_{m1}/C_o$ . Z kolei z wykresów 2 i 3 wynika, że dodanie do wodnych roztworów etanolu o stałej wartości, powoduje znaczącą zmianę przebiegu charakterystyk  $\Psi_1$  ( $C_{m1}/C_o$ ). Z wykresu 2 wynika, że  $\Psi_1$  jest ujemne w przedziale  $1 \leq C_{m1}/C_o \leq 50$ , a dodatnie dla  $C_{m1}/C_o > 50$ . Dla  $C_{m1}/C_o=30$  efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych osiąga minimum  $\Psi_1 = -12,7 \text{ mV}$ , a dla  $C_{m1}/C_o=70$  – maksimum  $\Psi_1 = 17,8 \text{ mV}$ . Dla  $C_{m1}/C_o > 70$   $\Psi_1$  maleje liniowo. Z kolei wykresu 3 wynika, że  $\Psi_1$  jest ujemne w przedziale  $1 \leq C_{m1}/C_o \leq 105$ , a dodatnie dla  $C_{m1}/C_o > 105$ .

Dla  $C_{m1}/C_o=60$  efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych osiąga minimum  $\Psi_1 = -23,2 \text{ mV}$ , a dla  $C_{m1}/C_o=115$  – maksimum  $\Psi_1 = 10,1 \text{ mV}$ . Dla  $C_{m1}/C_o > 115$   $\Psi_1$  maleje liniowo. Ponadto z wykresów 1, 2 i 3 przedstawionych na rycinie 1 wynika, że progresywne zwiększenie stężenia etanolu w wodnych roztworach NaCl powoduje, oprócz zmiany znaku  $\Psi_1$  i pojawienia się jego ujemnego minimum, zmniejszenie się wartości maksimum  $\Psi_1$  o około  $\Delta \Psi_1 = 7,4 \text{ mV}$ , przesunięcie maksimum o około  $C_{m1}/C_o=40$  oraz zmniejszenie wartości minimum  $\Psi_1$  o około  $\Delta \Psi_1 = -10,5 \text{ mV}$ .

Na rycinie 2 przedstawiono zależności efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_2$ ) od stężenia etanolu ( $C_{m2}$ ), przy ustalonym stosunku  $C_{m1}/C_o$ . Wykres 1 otrzymano dla  $C_{m1}/C_o=10$ , natomiast wykres 2 – dla  $C_{m1}/C_o=20$ . Z wykresu 1 wynika, że wzrost stężenia etanolu w roztworze o stałym stężeniu NaCl w przedziale  $0 \leq C_{m2} \leq 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  nie powoduje istotnej zmiany wartości  $\Psi_2$ . Dopiero dla  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1} < C_{m2} \leq 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$   $\Psi_2$  maleje skokowo od  $\Psi_2 = 18 \text{ mV}$  do  $\Psi_2 = -16 \text{ mV}$ . Dalszy wzrost stężenia etanolu od  $C_{m2}=3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  do  $C_{m2}=5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  powoduje zmniejszenie się wartości



$\Psi_2$  od -17,5 mV do -21 mV. Dla  $C_{m2} > 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$   $\Psi_2$  maleje liniowo i dla  $C_{m2} > 8 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  osiąga wartość -22,4 mV. Z wykresu 2 wynika, że wzrost stężenia etanolu w roztworze o stałym stężeniu NaCl w przedziale  $0 \leq C_{m2} \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  nie powoduje istotnej zmiany wartości  $\Psi_2$ . Dopiero dla  $3 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} < C_{m2} \leq 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$   $\Psi_2$  maleje skokowo od  $\Psi_2 = 23 \text{ mV}$  do  $\Psi_2 = -11,4 \text{ mV}$ . Dalszy wzrost stężenia etanolu od  $C_{m2} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  do  $C_{m2} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  powoduje zmniejszenie się wartości  $\Psi_2$  od -13 mV do -14,5 mV. Dla  $C_{m2} > 7 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$   $\Psi_2$  maleje liniowo i dla  $C_{m2} > 8 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  osiąga wartość -15,4 mV. Ponadto z wykresów 1 i 2 wynika, że 2-krotne zwiększenie stężenia NaCl w wodnych roztworach etanolu, powoduje przesunięcie charakterystyki  $\Psi_2(t)$  o około  $\Delta \Psi_2 = 6 \text{ mV}$  pionowo w górę i o około  $\Delta C_{m2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  poziomo w prawo.

Aby zademonstrować wzmacnianie efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych, weźmy pod uwagę wykresy 1, 2 i 3 przedstawione na rycinie 1. Z wykresu 1 wynika, że dla  $C_{m1}/C_o \geq 40$  taka sama zmiana wartości  $C_{m1}/C_o$  w przypadku roztworów dwuskładnikowych, wywołuje jednakową zmianę wartości  $\Delta \Psi_1$ . W przypadku roztworów trójskładnikowych, co ilustrują wykresy 2 i 3 na wspomnianej rycinie, taka sama zmiana  $C_{m1}/C_o$  wywołuje różne wartości i znaku zmiany wartości  $\Psi_1$ . Ilościową miarą wzmacniania efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych jest współczynnik wzmocnienia efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych  $a_1$ , określony przez następujące wyrażenie

$$a_1 = \frac{(\Delta \Psi_1)_t}{(\Delta \Psi_1)_b} \quad (4)$$

indeksy „t” oraz „b” odnoszą się odpowiednio do roztworu trójskładnikowego i dwuskładnikowego.

Na rycinie 3 przedstawiono zależność współczynnika  $a_1$  od średniego stosunku  $\langle C_{m1}/2C_o \rangle$ , który obliczono na podstawie wyrażenia

$$\langle (C_{m1}/2C_o)_k \rangle = \frac{1}{2C_o} \sum_{k=1}^{k+1} (C_{m1})_k \quad (5)$$

Wykres 1 otrzymano dla  $C_{m2} = 0,005 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ , a wykres 2 – dla  $C_{m2} = 0,01 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ . Z wykresu 1 wynika, że wartość współczynnika  $a_1$  początkowo jest stała i wynosi około  $a_1 = -0,5$ , a następnie dla  $\langle C_{m1}/2C_o \rangle > 35$  maleje skokowo i dla  $\langle C_{m1}/2C_o \rangle = 52,5$  osiąga wartość minimalną  $a_1 = -28$ . Dla  $\langle C_{m1}/2C_o \rangle > 52,5$   $a_1$  rośnie skokowo i dla  $\langle C_{m1}/2C_o \rangle > 65$  osiąga wartość stałą i dodatnią wynoszącą  $a_1 = 1$ . Z kolei z wykresu 2 wynika, że wartość współczynnika  $a_1$  początkowo jest stała i wynosi około  $a_1 = -1$ , a następnie dla

$[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]=35$  zmienia znak i rośnie skokowo do wartości  $a_1=2$ , a następnie maleje liniowo i dla  $[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]=95$  osiąga wartość  $a_1=-6$ . Dla  $[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]>95$  maleje skokowo i dla  $[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]=102,5$  osiąga wartość minimalną  $a_1=-28$ . Dla  $[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]>102,5$   $a_1$  rośnie skokowo i dla  $[\langle C_{m1}/2C_o \rangle]>125$  osiąga wartość stałą i dodatnią, wynoszącą  $a_1=1$ .

Z przebiegu krzywych 2 i 3 na rycinie 1 i krzywych 1 i 2 na rycinie 2 wynika, że wraz ze wzrostem  $C_{m1}/C_o$  przy ustalonej wartości  $C_2$  efekt  $\Psi_1$  zmienia zarówno wartość jak i znak. Podobnie, efekt  $\Psi_2$  zmienia zarówno wartość jak i znak wraz ze wzrostem  $C_2$  przy ustalonej wartości  $C_{m1}/C_o$ . Aby wyjaśnić mechanizm tego zjawiska rozpatrzmy dwie konfiguracje 2-membranowej komórki dyfuzyjnej przedstawione na rycinie 4. Rycina 4A przedstawia sytuację, w której gęstość roztworu, którym wypełniony jest przedział międzymembranowy jest większa od gęstości roztworu, który wypełnia przedziały zewnętrzne. Z kolei rycina 4B ilustruje sytuację, w której gęstość roztworu, którym wypełniony jest przedział międzymembranowy jest mniejsza od gęstości roztworu, którym wypełnione są przedziały zewnętrzne. W związku z tym dla sytuacji przedstawionej na rycinach 4A i 4B spełnione są warunki:  $C_{lu}^A > C_{rd}^A$  i  $C_{mu}^A < C_{md}^A$  oraz  $C_{lu}^B < C_{rd}^B$  i  $C_{mu}^B > C_{md}^B$ . Oznacza to, że w otoczeniu membrany dolnej ( $M_r$ ) dla sytuacji przedstawionej na rycinie 4A i w otoczeniu membrany górnej ( $M_l$ ) dla sytuacji przedstawionej na rycinie 4B oprócz dyfuzji zachodzi konwekcja swobodna, częściowo niszcząca stężeniowe warstwy graniczne i zapewniająca analogiczny gradient stężenia jak w przypadku membrany  $M_r$  usytuowanej w płaszczyźnie horyzontalnej (vide ryc. 3A). Owe gradienty gęstości są w przybliżeniu stałe [21]. Stałe i niezależne od stężenia powinny być też grubości stężeniowych warstw granicznych [21]. Z kolei w otoczeniu membrany górnej ( $M_l$ ) dla sytuacji przedstawionej na rycinie 4A i membrany dolnej dla sytuacji przedstawionej na rycinie 4B, konwekcja swobodna nie zachodzi. W związku z tym obszary obejmujące stężeniowe warstwy graniczne powiększają się. Zatem grubości warstw granicznych można jedynie określić stosując odpowiednie kryterium, np. Nernsta [22].

Analizując dane doświadczalne przedstawione na rycinach 1 i 2 i profile stężeniowe przedstawione na rycinach 4A i 4B można zauważyć, że zmiana wartości i znaku efektu  $\Psi_s$  spowodowana jest zmianą profilu stężeniowego w 2-membranowej komórce osmotyczno-dyfuzyjnej. Oznacza to, że niewielka zmiana gęstości roztworu powoduje szybką zmianę właściwości elektrycznych rozpatrywanej komórki dyfuzyjnej, któremu towarzyszy dodatkowo zjawisko wzmacnia efektu  $\Psi_s$  i sprzężenie zwrotne. Współczynnik wzmacniania,

który jest miarą wzmacniania owego efektu przyjmuje wartości zarówno dodatnie jak i ujemne, a dla roztworów trójskładnikowego i dwuskładnikowego, których gęstość jest równa i osiąga ujemną wartość minimalną. Zatem 2-membranowa komórka dyfuzyjna zawierająca w przedziale międzymembranowym roztwór trójskładnikowy o gęstości równej gęstości roztworów dwuskładnikowych, którymi wypełnione są przedziały zewnętrzne, może stanowić grawisensor. Postuluje się zatem możliwość występowania tego typu grawisensorów w komórce biologicznej, czułych na zmianę jej środowiska wewnętrznego, wpływającego na transport jonów przez odpowiednie membrany. Wyobrażamy sobie bowiem, że w warunkach mikrogravitacji z tego powodu, że transport zarówno cząstek naładowanych jak i nie naładowanych ma charakter dyfuzyjny, profile stężeniowe zarówno przez kompleks  $l_t^A/M/l_m^A$  jak i  $l_{rm}^A/M_r/l_r^A$  będą takie, jak przez kompleks  $l_t^A/M/l_m^A$  na rycinie 4A lub przez kompleks  $l_t^B/M_r/l_m^B$ . Wobec tego całkowite napięcie membranowe byłoby równe zeru. Zadziałanie bodźca grawitacyjnego spowoduje wystąpienie niezerowego efektu  $\Psi_s$ . Zgodnie z tą koncepcją nawet słaby sygnał grawitacyjny przetworzony na impuls elektryczny, mógłby być zarejestrowany z powodu występowania zjawiska wzmacniania efektu  $\Psi_s$ . Owa koncepcja jest niesprzeczna z danymi doświadczalnymi, otrzymanymi dla układów biologicznych [23-25].

## LITERATURA

- [1] CURRAN P. F., MC INTOSH J.R.: A model system for biological water transport. *Nature* (1962), 193, 347-348.
- [2] DIAMOND J. M., BOSSERT W. H.: Standing-gradient osmotic flow: a mechanism for solute-linked water transport in epithelia. *J. Gen. Physiol.* (1967), 50, 2061-2079.
- [3] PATLAK C. S., GOLDSTEIN D. A., HOFFMAN J. F.: The flow of solute and solvent across a two-membrane system. *J. Theoret. Biol.* (1963), 5, 426-442.
- [4] RICHARDSON I. W.: Multiple membrane systems as biological models. *Current-voltage behaviour.* (1972), 8, 219-236.
- [5] SPRING K. R.: Epithelial fluid transport – a century of investigation. *New Physiol. Sci.* (1999), 14, 92-100.
- [6] GUO P., HILLYARD S. D., FA B. M.: A two barrier compartment model for volume flow across amphibian skin. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* (2003), 285, 1384-1394.
- [7] KARGOL M., DWORECKI K., PRZESTALSKI S.: Gravitational flow amplification effects in a series membrane system. *Stud. Biophys.* (1979), 76, 137-144.

- [8] KEDEM O., KATCHALSKY A.: Permeability of composite membranes. Part 2. Parallel elements. Trans. Faraday Soc. (1963), 59, 1931-1940.
- [9] KEDEM O., KATCHALSKY A.: Permeability of composite membranes. Part 3. Series array of elements. Trans. Faraday Soc. (1963), 59, 1941-1953.
- [10] SKRZEKOWSKA-BARAN I.: Wpływ siły grawitacji na bierny transport membranowy roztworów elektrolitowych w układzie dwóch błon modelowych. Praca doktorska. ŚAM Zabrze 2001.
- [11] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., DWORECKI K.: Gravitational effects in a passive transmembrane transport: the flux graviosmotic and gravidiffusive effects in non-electrolytes. J. Biol. Phys. (2000), 26, 149-170.
- [12] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., JASIK-ŚLĘZAK J., SKRZEKOWSKA-BARAN I.: Strumieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie i trójskładnikowych roztworów nieelektrolitów. Polimery w Medycynie (2001), 31, 42-51.
- [13] ŚLĘZAK A., Wąsik, J., JASIK-ŚLĘZAK J., TWARDOKĘS W.: Ciśnieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie. Polimery w Medycynie (2001), 31, 25-32.
- [14] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., JASIK-ŚLĘZAK J., TWARDOKĘS W.: Strumieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie. Polimery w Medycynie (2001), 31, 33-41.
- [15] ŚLĘZAK A.: Model equations of the volume transport of multicomponent and heterogeneous non-ionic solutions in double-membrane systems. J. Biol. Phys. (1998), 24, 59-78.
- [16] ŚLĘZAK A.: Study of the solute flows of multicomponent and heterogeneous non-ionic solutions in double-membrane system. J. Biol. Phys. (2000), 26, 235-254.
- [17] ŚLĘZAK A., WĄSIK J.: The volume flows of non-electrolyte solutions across a vertically mounted membranes in a double-membrane system. Polish J. Med. Phys. & Eng. 2000, 6, 225-241.
- [18] WERNER H., ŚLĘZAK A.: Rola stężeniowych warstw granicznych w kreacji właściwości elektrycznych komórki zawierającej dwie membrany polimerowe i binarne roztwory elektrolityczne. Polimery w Medycynie (2007 w druku).
- [19] WERNER H.: Wpływ stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne dwumembranowej komórki dyfuzyjnej. Praca doktorska, ŚAM Zabrze, 2002.
- [20] ŚLĘZAK A.: A model equation for the gravielectric effect in electrochemical cell. Biophys. Chem. (1990), 38, 189-199.
- [21] ŚLĘZAK A., DWORECKI K., ANDERSON J. E.: Gravitational effects on transmembrane flux: the Rayleigh-Taylor convective instability. J. Membrane Sci. (1985), 23, 71-81.
- [22] DWORECKI K.: Interferometric investigation of near-membrane diffusion layers. J. Biol.

- Phys. (1995), 21, 37-49.
- [23] BEHERENS H.M., GRADMANN D., SIEVERS A.: Membrane-potential responses following gravistimulation in roots of *Lepidium sativum* L. *Planta* (1985), 163: 463-372.
- [24] ISHKAWA H., EVANS M.L.: Gravity-Induced Changes in Intracellular Potentials in Elongating ortical Cells of Mung Bean Roots. *Plant. Cell Physil.* (1990), 31, 457-462
- [25] TODD P.: Physical effects at the cellular level under altered gravity conditions. *Adv. Space. Res.* (1992), 12, 43-49.

Adres autorów

Katedra Biomedycznych Podstaw Kultury Fizycznej  
Wydział Zarządzania Politechniki Częstochowskiej  
42-200 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 36b  
tel. (034) 325 0395, tel./fax (034)361 3876  
e-mail: ajslezak@zim.pcz.pl

Tabela 1. Wartości parametrów transportowych membrany *Ultra Flo 145 Dialyzer* dla wodnych roztworów chlorku sodu (indeks 1) i etanolu (indeks 2) [20]

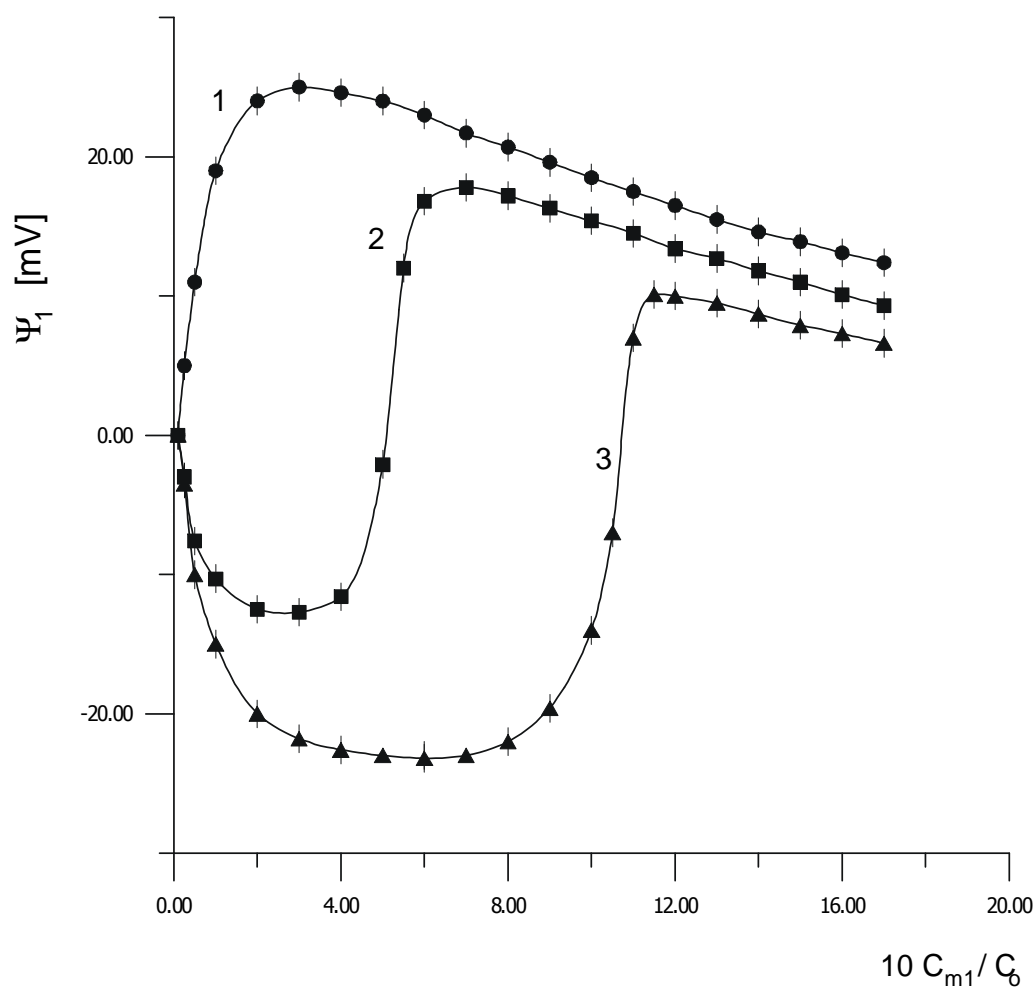
Table 1. Values of transport parameters of the membrane *Ultra Flo 145 Dialyzer* for aqueous sodium chloride (index 1) and ethanol (index 2) solutions [20]

Współczynnik	Wartość współczynnika	
	Konfiguracja A	Konfiguracja B
$L_p \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ N}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$0,85 \pm 0,1$	$0,85 \pm 0,1$
$\sigma_1 \times 10^2$	$16,7 \pm 0,5$	$16,7 \pm 0,5$
$\sigma_2 \times 10^2$	$8,2 \pm 0,1$	$8,2 \pm 0,1$
$\sigma_1^i \times 10^2$	$0,71 \pm 0,05$	$5,0 \pm 0,2$
$\sigma_2^i \times 10^2$	$3,1 \pm 0,2$	$0,39 \pm 0,04$
$\omega_{11} \times 10^{10} \text{ mol N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$5,5 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,1$
$\omega_{22} \times 10^{10} \text{ mol N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$4,00 \pm 0,08$	$4,00 \pm 0,08$
$\Omega_{11}^i \times 10^{10} \text{ mol N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,45 \pm 0,04$	$2,85 \pm 0,02$
$\Omega_{22}^i \times 10^{10} \text{ mol N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$2,10 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,01$

Tabela 2. Zależności współczynników  $\zeta_1^A$  i  $\zeta_1^B$  od stężenia chlorku sodu ( $C_1$ ) w  $0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  wodnym roztworze etanolu oraz zależności współczynników  $\zeta_2^A$  i  $\zeta_2^B$  od stężenia etanolu ( $C_2$ ) w  $2\times 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$  wodnym roztworze chlorku sodu dla membrany *Ultra Flo 145 Dialyzer*

Table 2. Dependence of coefficients  $\zeta_1^A$  and  $\zeta_1^B$  on sodium chloride concentration ( $C_1$ ) in  $0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  aqueous ethanol solution and dependence of coefficients  $\zeta_2^A$  and  $\zeta_2^B$  on ethanol concentrations ( $C_2$ ) in  $2\times 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$  aqueous sodium chloride solution for *Ultra Flo 145 Dialyzer* membrane

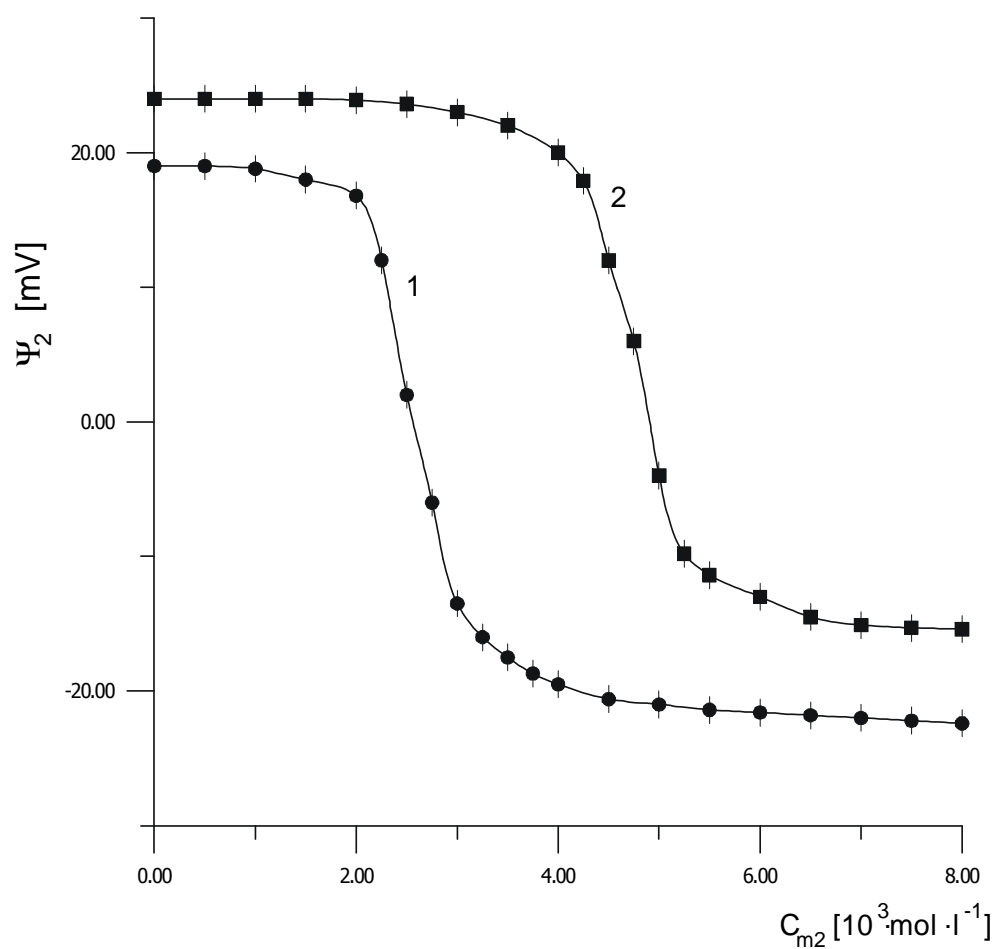
$C_1 \times 10^3 \text{ mol l}^{-3}$	$\zeta_1^A$	$\zeta_1^B$	$C_2 \times 10^3 \text{ mol l}^{-3}$	$\zeta_2^A$	$\zeta_2^B$
0,1	0,52	0,08	0	0,52	0,08
1	0,52	0,08	1	0,52	0,08
2	0,45	0,08	2	0,49	0,08
4	0,3	0,08	3	0,35	0,08
6	0,2	0,1	4	0,2	0,08
8	0,11	0,21	5	0,1	0,1
10	0,08	0,33	6	0,08	0,2
12	0,08	0,47	7	0,08	0,37
14	0,08	0,5	8	0,08	0,5
16	0,08	0,5	9	0,08	0,5



Ryc. 1. Zależności napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_1$ ) od stosunku stężeń  $C_{m1}/C_0$  NaCl w roztworach trójskładnikowych o stałym stężeniu etanolu ( $C_{m2}$ ). Wykres 1 uzyskano dla przypadku, w którym stężenie etanolu wynosiło  $C_{m2}=0 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ , wykres 2 – dla  $C_{m2}=0,005 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  oraz wykres 3 – dla  $C_{m2}=0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$

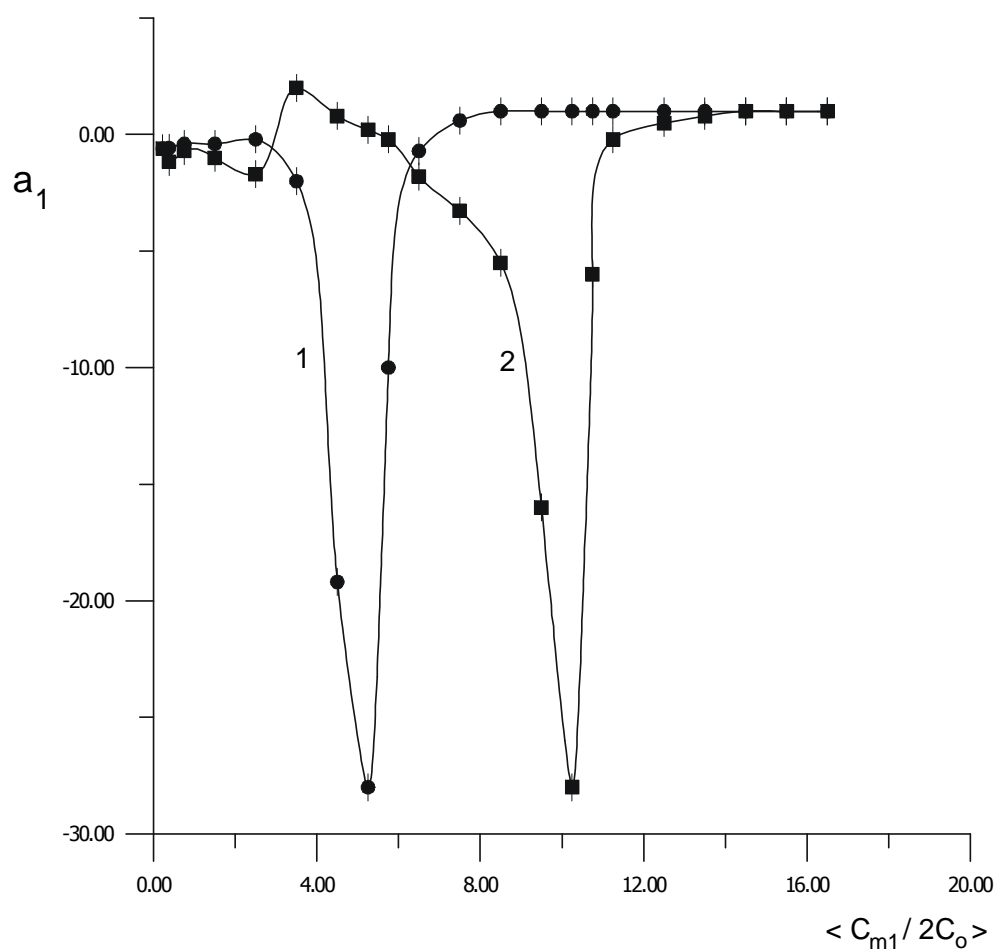
Fig. 1. The dependencies of voltage concentration boundary layers effect ( $\Psi_1$ ) on concentration quotient  $C_{m1}/C_0$  of NaCl in ternary solutions on constant ethanol concentration ( $C_{m2}$ ). Graph 1 was obtained for  $C_{m2}=0 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ , graph 2 – for  $C_{m2}=0,005 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  and graph 3 – for  $C_{m2}=0,01 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$





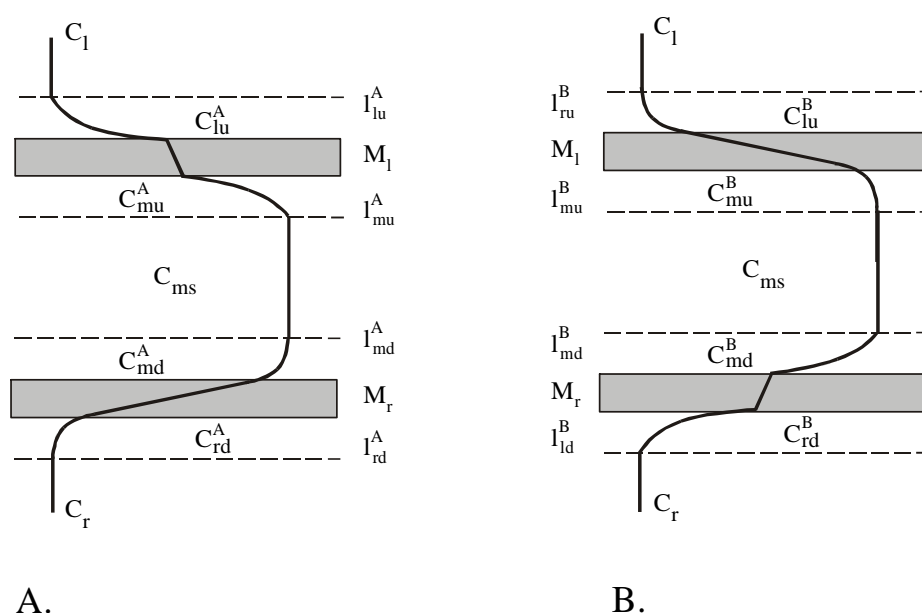
Rys. 2. Zależności napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych ( $\Psi_2$ ) od stężenia etanolu ( $C_{m2}$ ) w wodnym roztworze NaCl o stężeniu  $C_{m1}=10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  (wykres 1) oraz w wodnym roztworze NaCl o stężeniu  $C_{m1}=2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$  (wykres 2).

Fig. 2. The dependencies of voltage concentration boundary layers effect ( $\Psi_2$ ) on ethanol concentration ( $C_{m2}$ ) in ternary solutions on constant NaCl:  $C_{m1}=10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$  (graph 1) and  $C_{m1}=2 \times 10^{-3} \text{ mol l}^{-1}$  (graph 2).



Ryc. 3. Zależność współczynnika wzmacniania napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych ( $a_1$ ) od średniego stosunku stężeń NaCl ( $C_{m1}/2C_o$ ) dla roztworów trójskładnikowych o stałym stężeniu etanolu ( $C_{m2}$ ). Wykres 1 otrzymano dla  $C_{m2}=0,005$  mol l<sup>-1</sup> oraz wykres 2 – dla  $C_{m2}=0,01$  mol l<sup>-1</sup>

Fig. 3. Dependencies the amplification coefficient of voltage concentration boundary layers effect ( $a_1$ ) on average quotient of concentration NaCl ( $C_{m1}/2C_o$ ) for ternary solutions at constant ethanol concentration ( $C_{m2}$ ). Graph 1 was obtained for  $C_{m2}=0,005$  mol l<sup>-1</sup> and graph 2 – for  $C_{m2}=0,01$  mol l<sup>-1</sup>



Ryc. 4. Profile stężeniowe w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej zawierającej dwie jednakowe membrany  $M_l$ ,  $M_r$  usytuowane w płaszczyznach horyzontalnych i roztwory trójskładnikowe w przedziale międzymembranowym. W konfiguracji A gęstość roztworu  $C_{ms}$  jest większa od gęstości roztworów  $C_l$  i  $C_r$ , natomiast w konfiguracji B gęstość roztworu  $C_{ms}$  jest mniejsza od gęstości roztworów  $C_l$  i  $C_r$ . Symbole  $l_{lu}^A$ ,  $l_{mu}^A$ ,  $l_{md}^A$ ,  $l_{rd}^A$ ,  $l_{lu}^B$ ,  $l_{mu}^B$ ,  $l_{md}^B$ ,  $l_{rd}^B$  oznaczają stężeniowe warstwy graniczne odpowiednio w konfiguracji A i B;  $C_l$ ,  $C_{ms}$ ,  $C_r$  – stężenia roztworów poza stężeniowymi warstwami granicznymi;  $C_{lu}^A$ ,  $C_{mu}^A$ ,  $C_{md}^A$ ,  $C_{rd}^A$ ,  $C_{lu}^B$ ,  $C_{mu}^B$ ,  $C_{md}^B$ ,  $C_{rd}^B$  – stężenia roztworów na granicy membrana – stężeniowa warstwa graniczna

Fig. 4. Sketch of the double-membrane diffusion cell containing two identical membranes  $M_l$ ,  $M_r$  fixe In horizontal planes and ternary solutions in intermembranous compartment. In configuration A density solutions of concentration  $C_{ms}$  is greater than the density of solutions at concentrations  $C_l$  and  $C_r$ . In configuration B the density solution at concentration  $C_{ms}$  is lower than density solutions at concentrations  $C_l$  and  $C_r$ . Symbols  $l_{lu}^A$ ,  $l_{mu}^A$ ,  $l_{md}^A$ ,  $l_{rd}^A$ ,  $l_{lu}^B$ ,  $l_{mu}^B$ ,  $l_{md}^B$ ,  $l_{rd}^B$  signed the concentrations boundary layers in configurations A and B, respectively;  $C_l$ ,  $C_{ms}$ ,  $C_r$  – the concentrations of colution after concentratin boundary layers;  $C_{lu}^A$ ,  $C_{mu}^A$ ,  $C_{md}^A$ ,  $C_{rd}^A$ ,  $C_{lu}^B$ ,  $C_{mu}^B$ ,  $C_{md}^B$ ,  $C_{rd}^B$  – the concentrations of solution on the border membrane-concentration boundary layer

