

STEFAN DOROSZEWICZ

Szkoła Główna Handlowa

Katedra Technologii i Jakości Produktów

Al. Niepodległości 162, 02-554 Warszawa

Niestacjonarna metoda pomiaru współczynników przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe

Cz. I. UKŁAD I PROCEDURA POMIAROWA

TRANSIENT METHOD OF WATER VAPOUR PERMEABILITY COEFFICIENT DETERMINATIONS FOR PACKAGING FOILS. PART I. MEASURING SYSTEM AND PROCEDURE

Summary — A concept of transient transmission measurements of the coefficients of water vapour permeability (P_{H_2O}) through a packaging foil, based on the analysis of a sorptive sensor reaction inertia, was used to work out the measuring cell, the measuring system and the P_{H_2O} measurement method. Measurements were carried out in two phases: the initial phase of stabilization of the water concentration gradient, and the proper phase of measurement — its beginning was determined by the condition of steady-state permeation through the foil. The principles underlying the definition of the beginning of the proper measurement, conversion of the measured signal into relative humidity units, and the determination of the beginning of the sensor inertia analysis have also been developed. The uncertainty of the results obtained by this method was estimated at the significance level $\alpha = 0.5$. The accuracy of the method, *i.e.* the maximum relative uncertainty of a single result of τ_m was $B_{pmax} = 3\%$ in the case of a 35- μm thick low-density polyethylene foil.

CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA

Analiza bezwładności czujnika sorpcyjnego w trakcie niestacjonarnego przenikania pary wodnej przez badaną folię opakowaniową w dwukomorowym układzie pomiarowym może być, jak wykazałem w [1], podstawą wyznaczania współczynników przenikania pary wodnej P_{H_2O} . Warunek początkowy i warunki brzegowe niestacjonarnego transportu pary wodnej we wspomnianym układzie pomiarowym, odniesione do fazy gazowej przy powierzchniach badanej folii, mogą być w takim wypadku następujące:

$$RH(\tau_0) = RH_1(\tau_0) = \text{const} \quad (1)$$

$$RH(l, \tau) = RH_1(\tau) \quad (2)$$

$$RH(l + d, \tau) = RH_2(\tau) \cong 0, \quad (3)$$

przy czym $\tau > \tau_0$

gdzie: RH — wilgotność względna powietrza, RH — sygnał pomiarowy czujnika wyrażony w jednostkach wilgotności względnej, RH_1 i RH_2 — wilgotność względna przy powierzch-

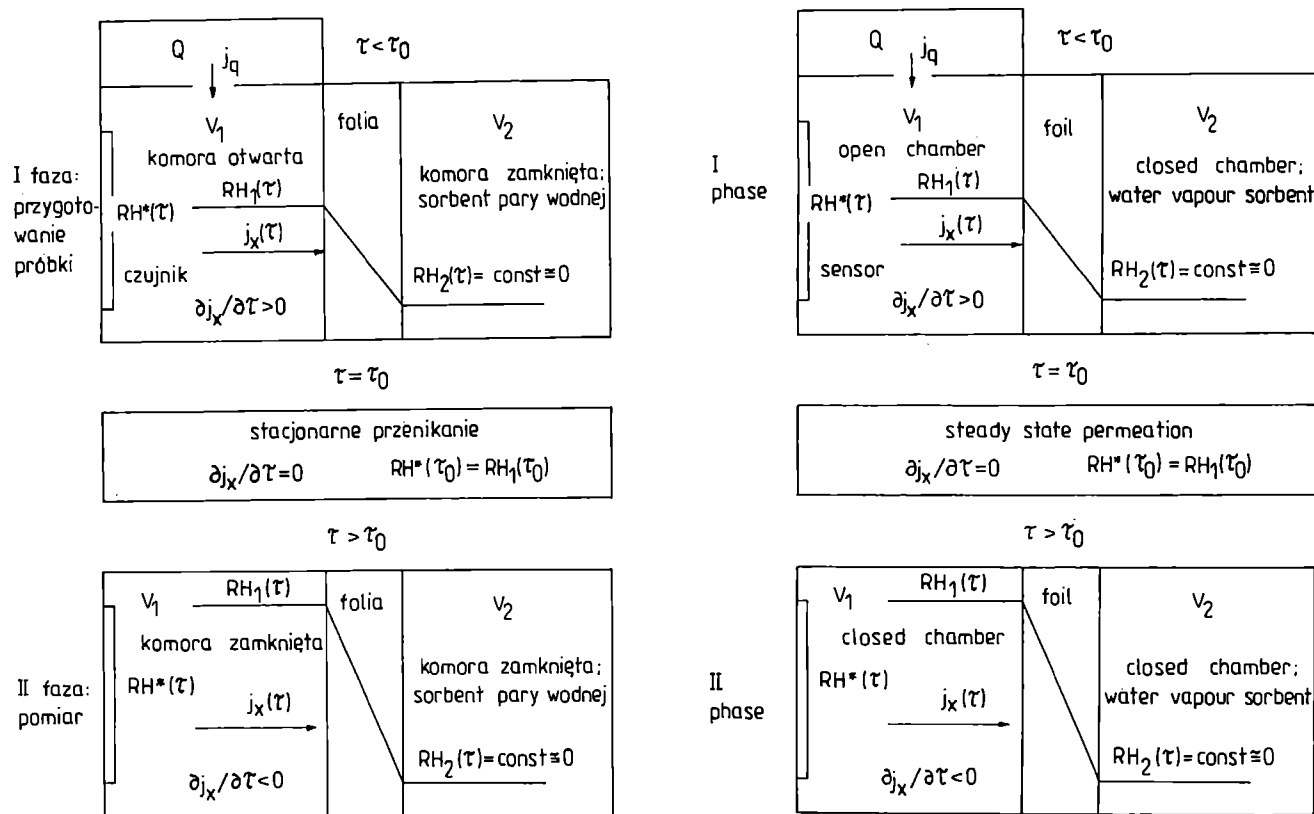
ni folii odpowiednio po stronie wejścia (indeks 1) i wyjścia (indeks 2) strumienia j_x pary wodnej z badanej folii, l — odległość folii od czujnika, d — grubość folii, τ — czas trwania transportu, τ_0 — moment początkowy przenikania niestacjonarnego.

Warunek początkowy (1) oznacza, że przed rozpoczęciem pomiarów ma miejsce w układzie stacjonarny transport penetranta.

Warunek brzegowy (2) oznacza, że w trakcie pomiarów, w komorze wejścia strumienia j_x wilgotność względna przy powierzchni folii jest funkcją (malejącą) czasu.

Warunek brzegowy (3) oznacza, że w trakcie pomiarów, w komorze wyjścia strumienia j_x wilgotność względna przy powierzchni folii jest stała, w przybliżeniu równa zero.

Wymienione warunki określają zasady analizy bezwładności czujnika sorpcyjnego i jednocześnie są przesłankami budowy układu pomiarowego do wyznaczania współczynników przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe, opartego na tych zasadach. Układ pomiarowy może w takim wypadku stanowić modyfi-



Rys. 1. Schemat ogólny układu pomiarowego transmisyjnej metody niestacjonarnej mierzenia współczynników przenikania pary wodnej (modyfikacja wariantu b metody stacjonarnej): Q — zewnętrzne źródło pary wodnej, j_q — strumień emitowany przez źródło zewnętrzne (opracowanie własne)

Fig. 1. A flow diagram of measuring system of transient transmission method of water vapour permeability measurements; a modification of „b” variant of steady state method; Q — an external water vapour source; j_q — a stream emitted by the external source; according to author's design

ację wariantu b układu stosowanego w stacjonarnych, izotermicznych i izostatycznych badaniach współczynników przenikania pary wodnej [2].

Rys. 1 przedstawia ogólny schemat zmodyfikowanego wariantu b, ilustrując równocześnie dwie fazy procedury pomiarowej dostosowanej do warunków (1), (2), (3) — przygotowanie próbki i właściwy pomiar.

W pierwszej fazie, gdy $\tau < \tau_0$, zachodzi ustalanie gradientu $\partial c/\partial x$ stężenia pary wodnej w materiale folii. Komora V_1 jest wtedy przestrzenią otwartą zasilaną strumieniem j_q z zewnętrznego źródła Q . Funkcje $RH^*(\tau < \tau_0)$ i $RH_1(\tau < \tau_0)$ są rosnące i strumień pary wodnej przenikającej przez folię zmienia się w czasie, przy czym $\partial j_x/\partial \tau > 0$.

Komora V_2 zarówno w pierwszej, jak i w drugiej fazie pomiaru jest przestrzenią zamkniętą, wypełnioną sorbentem pary wodnej zapewniającym stałą wilgotność względną.

W momencie τ_0 transport penetranta, praktycznie biorąc, osiąga przebieg stacjonarny. Funkcje $RH^*(\tau)$ i $RH_1(\tau)$ przybierają ustaloną, taką samą wartość (przy założeniu, że gradient wilgotności względnej $\partial RH/\partial x$ w komorze V_1 jest pomijalnie mały).

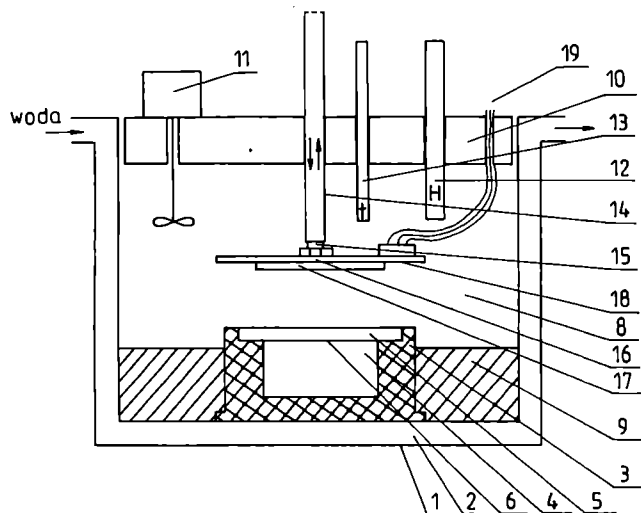
W drugiej fazie pomiaru, gdy $\tau > \tau_0$, ma miejsce właściwy pomiar współczynnika pary wodnej. W momencie

τ_0 komorę V_1 odcina się od źródła Q , wymuszając niestacjonarne przenikanie penetranta przez folię. Funkcje $RH^*(\tau > \tau_0)$ i $RH_1(\tau > \tau_0)$ są malejące, przy czym ze względu na bezwładność reakcji czujnika $RH^* > RH_1$. Strumień j_x jest malejącą funkcją czasu: $\partial j_x/\partial \tau < 0$.

W momencie τ_0 rozpoczyna się pomiar sygnału $RH^*(\tau)$, a w konsekwencji wobec znanej stałej K przyrzędu, wyznaczanie współczynnika przenikania pary wodnej przez badaną próbkę folii [1].

SCHEMAT UKŁADU I CELKI POMIAROWEJ

W nawiązaniu do schematu układu pomiarowego i dwufazowej procedury pomiarowej (rys. 1) zaprojektowałem celkę, której schemat przedstawia rys. 2. Na dnie cylindrycznej celki (1) pojemności ok. 7 dm³, wykonanej ze stali kwasoodpornej i wyposażonej w płaszcz wodny (2), umocowano dwukomorowe naczynko pomiarowe (3). Dolną komorę V_2 (4) naczynka wypełniono sorbentem. Górna komora V_1 (5), oddzielona od dolnej badaną folią (6), w pierwszej fazie pomiaru była otwarta, kontaktując się z komorą V_3 (8) celki. Na dnie celki, wokół naczynka pomiarowego, znajdował się roztwór higrostatyczny (9) — źródło pary wodnej Q . W pokrywę celki



Rys. 2. Schemat celki z naczynkiem pomiarowym — objaśnienia w tekście (opracowanie własne)

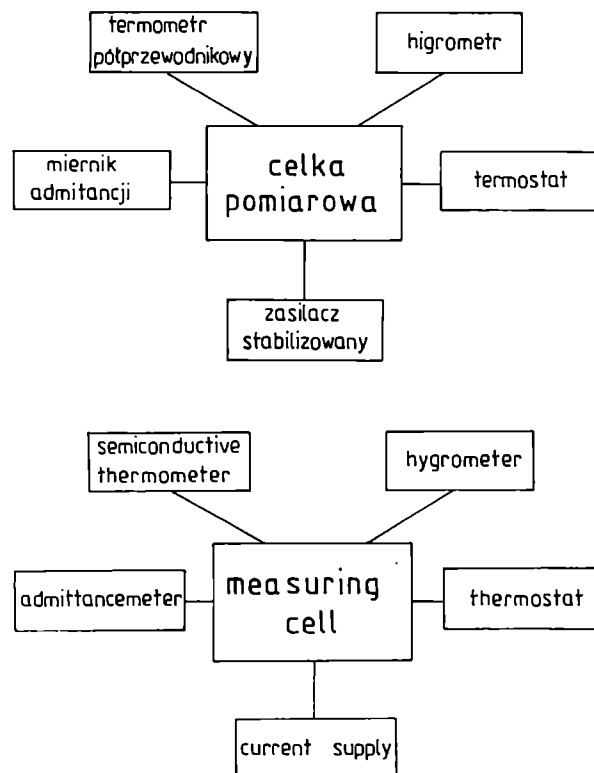
Fig. 2. Diagram of the measuring cell with measuring vessel, according to author's design: 1 — measuring cell, 2 — water jacket, 3 — measuring vessel, 4 — V_2 chamber, 5 — V_1 chamber, 6 — foil, 8 — V_3 chamber, 9 — hygostatic solution, 10 — cell cover, 11 — fan motor, 12 — hygrometer, 13 — thermometer, 14 — sleeve, 15 — stem, 16 — plate, 17 — sensor, 18 — semiconductive thermometer, 19 — electrical leads

(10) wbudowano wentylator (11) z silnikiem o stałej prędkości obrotowej. W pokrywie zamontowano też higrometr elektroniczny (12) o czułości $s = 10\%$ i zasięgu $0 < RH < 100\%$ oraz termometr rtęciowy (13) o czułości $s = 20/^\circ\text{C}$ i zasięgu $0 < t < 50,00^\circ\text{C}$. Zarówno termometr, jak i czujnik higrometru w komorze V_3 był zanurzony do poziomu górnej krawędzi naczynka pomiarowego. W pokrywie celki wbudowano centralnie tuleję (14), wewnątrz której, prostopadle do górnej płaszczyzny naczynka pomiarowego można było przemieszczać trzpień (15). Do trzpienia, równolegle do górnej płaszczyzny naczynka pomiarowego, przymocowano płytę (16). Na dolnej powierzchni płyty znajdował się płaskorównoległy czujnik sorpcyjny (17) oraz czujnik termometru półprzewodnikowego (18) o czułości $s = 10/^\circ\text{C}$. Na górnej powierzchni płyty umocowano złącza (19) przewodów czujnika sorpcyjnego i termometru półprzewodnikowego.

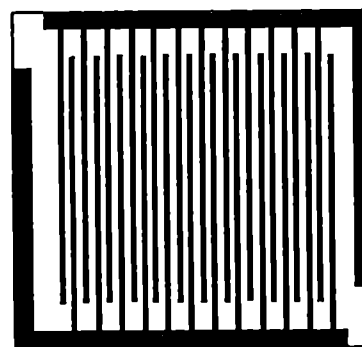
Na dolnej powierzchni płyty przy jej krawędzi przeprowadzono warstwę smaru silikonowego. Podobną warstwę nanoszono na górną krawędź powierzchni naczynka pomiarowego.

W pierwszej fazie pomiarów, w trakcie przygotowywania próbki do badań, płyta (16) znajdowała się nad naczynkiem (3), aby zapewnić kontakt źródła Q z komorą V_1 . W drugiej fazie, w trakcie właściwego pomiaru, płyta opuszczona i docięnięta do górnej powierzchni naczynka pomiarowego odcinała komorę V_1 od źródła Q .

Przedstawiona celka stanowiła element układu pomiarowego, którego schemat ilustruje rys. 3. W roli czujnika sorpcyjnego zastosowałem kondensator powierzchniowy; jego elektrody w postaci ścieżek przewodzących



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego
Fig. 3. Diagram of the measuring system



Rys. 4. Czujnik pomiarowy (opracowanie własne)
Fig. 4. Measuring system, according to author's design

znajdowały się na polerowanej płaszczyźnie dielektryka (rys. 4).

Pierwotnym sygnałem pomiarowym czujnika były składowe G_{mp} i C_{mp} admitancji powierzchniowej Y_p :

$$Y_p = [(G_{mp} - G_{po})^2 + [2\pi \cdot f \cdot 10^{-9} (C_{mp} - C_{po})]^2]^{1/2} \quad (4)$$

gdzie: G_{mp} — wartość mierzona przewodności powierzchniowej, G_{po} — przewodność powierzchniowa czujnika gdy $RH = 0$, C_{mp} — wartość mierzona pojemności powierzchniowej czujnika, C_{po} — pojemność powierzchniowa czujnika gdy $RH = 0$, f — częstotliwość napięcia pomiarowego.

Jako miernik admitancji zastosowałem mostek RLC typ E-318 prod. P.A. i A.P. „Meratronik-Szczecin”. W pomiarach korzystałem z funkcji CG mostka.

SPOSÓB PROWADZENIA POMIARÓW

Dwie fazy pomiaru przedstawione na rys. 1 realizuje się w opracowanym układzie w następujący sposób:

I faza — przygotowanie próbki

Po wprowadzeniu do komory V_2 sorbenta przykleja się badaną próbkę oraz pierścień stabilizujący do wycięcia w naczynku pomiarowym i zamyka komorę V_3 . Na dnie komory V_3 znajduje się nasycony roztwór NaCl. Płyta z czujnikiem jest zawieszona nad naczynkiem pomiarowym, komora V_1 jest otwarta. Celkę termostatuje się w temperaturze $T = 298,2 \pm 0,1$ K. Wewnątrz celki ma miejsce wymuszony ruch powietrza.

Czas trwania I fazy zależy od wydajności źródła pary wodnej w komorze V_3 i od współczynnika dyfuzji D pary wodnej w materiale folii. W wypadku próbek o małych wartościach D , czas τ_u ustalania się gradientu stężenia wody w próbce jest limitowany współczynnikiem dyfuzji. Wartość τ_u określa się wówczas w przybliżeniu na podstawie uproszczonego równania czasu opóźnienia τ_l — *time lag*

$$\tau_l = d^2 / 6D \quad (5)$$

$$\tau_u \approx 3\tau_l = d^2 / 2D \quad (6)$$

gdzie: d — grubość folii [3].

W wypadku folii o dość dużych współczynnikach dyfuzji czas ustalania gradientu zależy od wydajności źródła pary wodnej. Wartość τ_u takich folii określa się na podstawie zmian w czasie temperatury, wilgotności względnej oraz sygnału $Y_p(\tau)$ czujnika. W wypadku folii wysokobarierywnych o nieznanych współczynnikach dyfuzji, np. folii metalizowanych, τ_u wyznacza się wagową metodą naczynkową [4].

II faza — pomiar właściwy

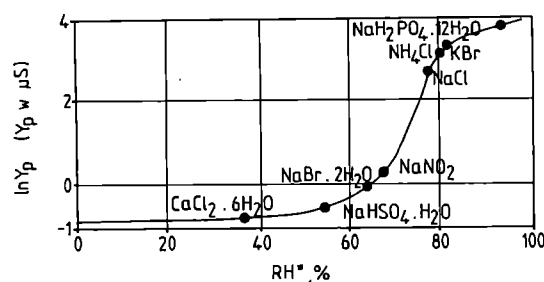
Po osiągnięciu przenikania stacjonarnego, w momencie τ_0 opuszcza się płytę z czujnikiem, zamykając komorę V_1 . Począwszy od momentu τ_0 rejestruje się przebieg funkcji $Y_p(\tau)$ charakteryzującej niestacjonarne przenikanie pary wodnej przez badaną próbkę folii. Pomiary prowadzi się w przedziale czasu $\tau_0 + \Delta\tau$, określonym przez wycinek dielektrycznej izotermy $\ln Y_p(RH)_T$ adsorpcji pary wodnej na powierzchni czujnika (por. następny punkt).

DIELEKTRYCZNA IZOTERMA ADSORPCJI PARY WODNEJ NA NIEPOROWATEJ POWIERZCHNI CZUJNIKA; ZASADA WYRAŻANIA SYGNAŁU POMIAROWEGO W JEDNOSTKACH WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ

W temperaturze $T = 298,2 \pm 0,1$ K w celu wykonano pomiary dielektrycznej izotermy $Y_p(RH)_T$ adsorpcji pary wodnej na nieporowatej powierzchni czujnika. Na dnie

komory V_3 kolejno umieszczano nasycone roztwory następujących soli: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — $RH = 35,3\%$; $\text{NaHSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — $RH = 56,2\%$; $\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — $RH = 64,2\%$; NaNO_2 — $RH = 67,2\%$; NaCl — $RH = 76,5\%$; NH_4Cl — $RH = 79,3\%$; KBr — $RH = 83,8\%$; $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ — $RH = 94,6\%$ oraz wysuszony pod zmniejszonym ciśnieniem w temp. 405 K proszek żelu krzemionkowego o szerokich porach — $RH \approx 0$.

Przedstawione wartości wilgotności względnej zmierzono higrometrem (rys. 2, poz. 12) w warunkach wymuszonego ruchu powietrza w komorze V_3 . Jednocześnie wykonano pomiary admitancji powierzchniowej. Uzyskane wyniki ilustruje rys. 5 w postaci dielektrycznej izotermy $\ln Y_p(RH)_T$ [3].



Rys. 5. Dielektryczna izoterma $\ln Y_p(RH)_T$ adsorpcji pary wodnej na nieporowatej powierzchni czujnika; $T = 298 \pm 0,1$ K (wyniki własne)

Fig. 5. Dielectric isotherm $\ln Y_p(RH)_T$ of water vapor adsorption on the non-porous surface of the sensor; $T = 298.2 \pm 0.1$ K, according to author's design

W pomiarach przenikania wykonywanych opisywaną tu metodą niestacjonarną wykorzystałem wycinek dielektrycznej izotermy ograniczony punktami wilgotności względnej NaNO_2 (67,2%) i NaCl (76,5%). Przebieg funkcji $\ln Y_p(RH)_T$ w tym przedziale można z dobrym przybliżeniem uznać za liniowy, co stwarza podstawę do wyrażania sygnału pierwotnego Y_p w jednostkach wilgotności względnej, zgodnie z równaniem

$$RH^* = a_1 \cdot \ln Y_p + a_0 \quad (7)$$

gdzie: RH^* — sygnał pomiarowy wyrażony w jednostkach wilgotności względnej, a_0 oraz a_1 — parametry wyznaczane doświadczalnie na podstawie pomiarów admitancji czujnika umieszczonego kolejno nad roztworami NaNO_2 i NaCl .

Wilgotność względną powietrza w komorze V_1 w momencie $\tau_0 = RH^*(\tau_0) = RH_1(\tau_0)$ stacjonarnego transportu pary wodnej w celu pomiarowej utożsamiano, z pomijalnie małym błędem, z wilgotnością względną punktu NaCl izotermy.

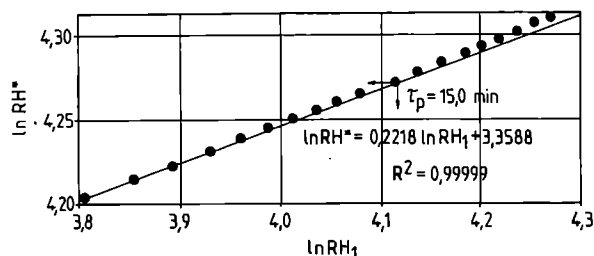
W II fazie pomiaru niestacjonarne przenikanie wymusza desorpcję pary z powierzchni czujnika i tym samym malejącą funkcję $Y_p(\tau)$. Zakres pomiarów zmian tej funkcji był limitowany wilgotnością względną punktu NaNO_2 izotermy i identyfikowany na podstawie równania (7).

MOMENT POZĄTKOWY ANALIZY FUNKCJI $\Delta(\tau)$

W momencie τ_0 zamknięcia komory V_1 naczynka pomiarowego następuje niewielka skokowa zmiana warunków wymiany masy i ciepła na powierzchni czujnika, która wpływa na mierzony sygnał $Y_p(\tau)$. Efektem jest niemonotoniczny przebieg funkcji $RH^*(\tau)$ w okresie bezpośrednio po zamknięciu komory V_1 . Im mniejszy jest współczynnik przenikania przez badaną próbkę, tym dłuższy jest przedział czasu trwania niemonotonicznego sygnału. Moment końcowy tego przedziału i jednocześnie moment początkowy badania funkcji $\Delta(\tau)$ wyznaczałem na podstawie analizy zależności $\ln RH^*(\tau)$ od $\ln RH_1(\tau)$ w przedziale $\tau \geq \tau_0$. Zgodnie z hipotezą wprowadzoną w [1], funkcje $RH^*(\tau)$ i $RH_1(\tau)$ mogą być opisane modelem wykładniczym o ogólnej postaci

$$RH = RH_0 \exp(-A \cdot \tau) \quad (8)$$

Różni je wartość parametru A . W związku z powyższym, monotoniczny przebieg sygnału $Y_p(\tau)$, a w konsekwencji funkcji $RH^*(\tau)$, jest równoznaczny z liniowym przebiegiem zależności $\ln RH^*(\tau)$ od $\ln RH_1(\tau)$ (funkcja $RH_1(\tau)$, jak to wynika z bilansu masy pary wodnej po obydwu stronach badanej folii, jest zależnością wykładniczą [1]). Moment początkowy τ_p liniowego przebiegu tej funkcji traktowałem zatem jako kryterium wyznaczające zakończenie zaburzeń sygnału związanych z zamknięciem komory V_1 i jednocześnie początek zakresu analizy bezwładności $\Delta(\tau)$ reakcji czujnika.



Rys. 6. Przebieg zależności $\ln RH^*(\tau)$ od $\ln RH_1(\tau)$; próbka folii PE-LD, temp. $298,15 \pm 0,05K$, $P_{H_2O} = 3,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} (24 \text{ h})^{-1} RH^{-1} \cdot 10^2$ (wyniki własne)

Fig. 6. Relationship of $\ln RH^*(\tau)$ vs. $\ln RH_1(\tau)$ for PE-LD sample, $T = 298.15 \pm 0.05 \text{ K}$, $P_{H_2O} = 3.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} (24 \text{ h})^{-1} RH^{-1} \cdot 10^2$ (own results)

Rys. 6, jako przykład, ilustruje wyniki doświadczalne dotyczące jednego z pomiarów folii polietylenowej (PE-LD, por. następny punkt), które stanowiły podstawę określenia momentu τ_p .

Analiza zmiennej resztowej równania regresji zależności $\ln RH^*(\tau)$ od $\ln RH_1(\tau)$ nie wykazała osobliwości ($R^2 = 0,99999$), wskazując, że równanie liniowe jest tu poprawnym modelem. Uzyskany wynik potwierdza hipotezę o wykładniczej postaci funkcji $RH^*(\tau)$, wprowadzoną uprzednio w [1].

NIEPEWNOŚĆ OZNACZENIA WARTOŚCI τ_m

Podstawę wyznaczania współczynników przenikania pary wodnej (P_{H_2O}) przez folie opakowaniowe w opracowanej metodzie stanowi czas maksymalnego opóźnienia τ_m reakcji czujnika [1]. W określonych warunkach pomiarów, wobec ustalonej wartości K (stałej przyrządu) w równaniu:

$$\ln \tau_m = \ln P_{H_2O} + \ln K \quad (9)$$

niepewność oznaczenia τ_m warunkuje niepewność pomiaru P_{H_2O} .

W celu określenia niepewności wyników pomiarów współczynników przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe uzyskiwanych omawianą metodą przeprowadziłem serię pomiarów sześciu niezależnych próbek folii PE-LD grubości $d = 35 \mu\text{m}$ (folia prod. Z.Ch. „Oświęcim”). Wartość P_{H_2O} badanej folii uprzednio określano wagową metodą naczynkową, uzyskując $P_{H_2O} = 3,53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} (24 \text{ h})^{-1} RH^{-1} \cdot 10^2$ [4]. Pomiaru prowadzono w następujących warunkach: $T = 298,15 \pm 0,05K$, $\Delta RH = 76,5\%$ (nasycony roztwór NaCl i wysuszony żel krzemionkowy odpowiednio po obydwu stronach folii). W wyniku pomiarów dotyczących poszczególnych próbek uzyskano następujące równania funkcji $RH^*(\tau)$, odpowiadające im równania funkcji $RH_1(\tau)$ oraz wartości τ_m :

$$\begin{aligned} RH_1^* &= 75,42 \exp(-3,1884 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,1} = 75,42 \exp(-1,3944 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 137,186 \text{ min} \\ RH_2^* &= 75,46 \exp(-3,0729 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,2} = 75,46 \exp(-1,3944 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 139,124 \text{ min} \\ RH_3^* &= 74,42 \exp(-3,0820 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,3} = 75,42 \exp(-1,3946 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 138,956 \text{ min} \\ RH_4^* &= 74,86 \exp(-3,1079 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,4} = 74,86 \exp(-1,4092 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 137,623 \text{ min} \\ RH_5^* &= 75,56 \exp(-3,0794 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,5} = 75,56 \exp(-1,4027 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 138,501 \text{ min} \\ RH_6^* &= 75,40 \exp(-2,8990 \cdot 10^{-3} \tau); RH_{1,6} = 75,40 \exp(-1,4093 \cdot 10^{-2} \tau); \\ \tau_m &= 141,264 \text{ min} \end{aligned}$$

Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ test jednorodności próby nie dał podstaw do odrzucenia skrajnych wartości τ_m .

W odniesieniu do powyższych wyników, na poziomie $\alpha = 0,05$, wyznaczyłem estymator przedziałowy oraz względną niepewność B_p rzeczywistej średniej wartości τ_m :

$$\tau_m = \bar{\tau}_m \pm \Delta \tau_m = 138,8 \pm 1,5 \text{ min}, B_p = 1,1\%.$$

Niepewność maksymalna pojedynczego wyniku wynosi tu $\Delta \tau_{max} = 4,3 \text{ min} \Leftrightarrow B_{pmax} = 3,1\%$.

Wyznaczone niepewności świadczą o dużej powtarzalności wyników pomiarów omawianą metodą. Zakładając, że stała K w równaniu (9) jest wyznaczona rzetelnie, o czym decydują właściwości metody porównawczej (tu — wagowej metody naczynkowej) lub folii standardowych, opracowana metoda jest dokładnym, powtarzalnym narzędziem pomiaru współczynników przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe.

WNIOSKI

— Sygnał $Y_p(\tau)$ mierzony w danych warunkach niestacjonarnego przenikania w opracowanym układzie pomiarowym i jego liniowe przekształcenie $RH^*(\tau)$ są funkcjami wykładniczymi. Tym samym na przykładzie folii PE-LD doświadczalnie potwierdzono hipotezę dotyczącą postaci funkcji $\Delta(\tau)$ charakteryzującej bezwładność czujnika podczas niestacjonarnego transportu pary wodnej w tym układzie pomiarowym.

— Opracowana metoda jest dokładnym, powtarzalnym narzędziem badania przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe. Względna niepewność średniej wartości czasu maksymalnego opóźnienia reakcji czujnika wynosi ok. 1%, a maksymalna niepewność względna pojedynczego wyniku, równoznaczna z dokładnością metody, wynosi ok. 3%.

LITERATURA

1. Doroszewicz S.: *Polimery* 1996, 41, nr 6.
2. Lohmeyer S.: *Gummi, Fasern, Kunstst.* 1987, 40, nr 2, 80.
3. Doroszewicz S.: „Metoda badania kinetyki przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe”, Monografie i Opracowania, SGH, Warszawa 1995, str. 99.
4. Stannett V., Yasuda H.: „Testing of Polymers”, Interscience Publishers, Nowy Jork 1965, t. 1, str. 393.
5. PN-82/O-79111: Opakowania. Arkuszowe materiały opakowaniowe. Oznaczenie przenikania pary wodnej metodą wagową.

Otrzymano 8 VIII 1995 r.

W kolejnym zeszycie ukażą się następujące artykuły:

- Dendrymeryzacja — nowa metoda syntezy polimerów
- Organiczne związki siarki jako inicjatory polimeryzacji. Cz. IV. Polimeryzacja metakrylanu metylu wobec tiobenzoesanu S-(4-benzoilo)fenylu (*wersja angielska*)
- Biodegradacja chitozanu (*wersja angielska*)
- Warunki stabilności wodnych żywic akrylowo-metakrylowych
- Niestacjonarna metoda pomiaru współczynników przenikania pary wodnej przez folie opakowaniowe. Cz. II. Wyznaczanie współczynników przenikania
- Wybrane właściwości wytłaczanego polietylenu porowatego
- Model matematyczny procesu wytłaczania jednoślismakowego. Cz. VI. Przepływ tworzywa uplastycznionego
- Symulacja procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych za pomocą systemu I-DEAS Thermoplastic Molding™
- Badania metodą analizy termicznej procesu karbonizacji poliakrylonitrylu modyfikowanego za pomocą $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ lub FeCl_2 (*wersja angielska*)