

Załącznik 2a

Autoreferat

Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe w szczególności
określone w art. 16 ust. 2 Ustawy

dr Marcin Lackowski

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN
Zakład Wymiany Ciepła
ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk
marcin.lackowski@imp.gda.pl

Gdańsk 2018

1. Imię i Nazwisko

Marcin Lackowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2004 **stopień doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki (z wyróżnieniem)**

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Elektryzowanie jonowe aerozolu w polu elektrycznym*

Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk im. Roberta Szwalskiego w Gdańsku

promotor : prof. dr hab. inż. Anatol Jaworek

recenzent: prof. dr hab. inż. G. Śliwiński i dr hab. inż. A. Podgórski

1999 **stopień magistra, kierunek: fizyka**

specjalność: fizyka eksperymentalna

Tytuł pracy dyplomowej: Stan polaryzacji światła ugiętego na fali ultradźwiękowej rozchodzącej się w cieczach

Uniwersytet Gdański, Wydział Matematyki i Fizyki

promotor: prof. dr hab. Piotr Kwiek

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

Miejsce zatrudnienia:

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Energetyki Ciepłej, Zakład Wymiany Ciepła
ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk

Historia zatrudnienia:

2014 – starszy specjalista (Kierownik Zakładu Wymiany Ciepła IMP PAN)

2005-2013 adiunkt (IMP PAN)

1999-2004 asystent (IMP PAN)

1999 specjalista (IMP PAN)

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej, wskazuję cykl 9 publikacji oraz patent, powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

Oddziaływanie pola elektrycznego na przepływ dwufazowy cieczy dielektrycznej

b) Wykaz wybranego cyklu publikacji

- B1. **M. Lackowski**, Urządzenie do regulacji mikroprzepływów PL 223329 (patent uzyskany w 2016, zgłoszony w roku 2012)
- B2. **M. Lackowski**, Dielectrophoresis Flow Control of Volatile Fluids in Microchannels. *Journal of Thermal Sciences* **24** (2015), No. 5, 1-5
- B3. **M. Lackowski**, A. Krupa, D. Butrymowicz, Dielectrophoresis Flow Control in Microchannels. *Journal of Electrostatics* **71** (2013), 921-925
- B4. **M. Lackowski**, H. Nowakowska, Numerical modelling of dielectrophoresis (DEP) effect in microchannel flow controller – comparison of calculation methods. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, Nr 8/2016, 95-98, doi:10.15199/48.2016.08.26
- B5. **M. Lackowski**, H. Nowakowska, Dynamics of dielectric liquid rise between parallel electrodes under capillary and dielectrophoretic forces. *Journal of Physics D: Applied Physics* **51** (2018), 055304
- B6. **M. Lackowski**, J. Karwacki, Experimental analysis of the DEP forces influence on temporal height-of-rise in a capillary system for boiling control in microchannel. XVI International Conference on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, 2016, p. 201-206
- B7. **M. Lackowski**, R. Kwidzinski Dynamic Modelling of the DEP Controlled Boiling in a Microchannel, *Journal of Thermal Sciences* **27** (2018), No. 2, 167-174
- B8. **M. Lackowski**, R. Kwidzinski, J. Karwacki, T. Przybyliński, Experimental observations of flow structures during DEP controlled boiling in a microchannel, *Archives of Thermodynamics* **38** (2018), No. 1, 125–141, doi: 10.1515/aoter-2018-0007
- B9. **M. Lackowski**, T. Przybyliński, J. Karwacki, Electrohydrodynamic technique of condensation enhancement. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, Nr 8/2016, 92-94, doi:10.15199/48.2016.08.25
- B10. **M. Lackowski**, New dielectrophoretic system for microflow control, *Annual Report of the Polish Academy of Sciences*, 2017, pp. 52-53

Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku zostały zamieszczone w załączniku 4.

- c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wstęp

W niniejszym referacie autor przedstawia charakterystykę swojego osiągnięcia naukowego dotyczącego wykorzystania zjawiska dielektroforezy do kontroli przepływu cieczy dielektrycznej. Zjawisko dielektroforezy (DEP) polega na występowaniu siły działającej na dielektryk znajdujący się w niejednorodnym polu elektrycznym. Siła ta występuje mimo, że na dielektryku nie ma swobodnego ładunku elektrycznego. Jej kierunek zależy od różnicy polaryzowalności dielektryka i ośrodka. Jeśli różnica ta jest dodatnia, dielektryk jest wciągany w kierunku silniejszego pola elektrycznego. Kiedy siła dielektroforetyczna działa nie na obiekty w postaci cząstek lub kropli, ale na ciecz jako całość, zwykle zjawisko to odróżnia się i nazywa dielektroforezą cieczową („liquid dielectrophoresis”, LDEP). Zjawisko LDEP zostało po raz pierwszy zademonstrowane przez Pellat’a w roku 1894 (Pellat H.: *Force agissant a la surface de separation de deux dielectriques. CR Seances Acad. Sci. (Paris)*, **119**(1894)), a eksperyment przedstawiony w tej pracy jest uważany za klasyczny.

Zjawisko dielektroforezy cieczy jest w ostatnim okresie intensywnie badane w kontekście zastosowań biotechnologicznych i medycznych, głównie do kontroli ruchu na poziomie komórkowym. Było ono wykorzystywane do transportu pojedynczych cząstek, komórek i kropli w zastosowaniach związanych z rozwojem analityki medycznej wykorzystującej nano lub mikro systemy „lab-on-chip” (Ramos A., Morgan H., Green N.G., Castellanos A., *A review of forces in microelectrode structures. J. Phys. D: Appl. Phys.* (1998) L25-30). Dielektroforeza wykorzystywana jest również w technikach separacji komórek rakowych z krwi ludzkiej (Becker F.F., Wang X.-B., Huang Y., Pethig R., Vykoukal J., Gascoyne P.R.C., *Separation of human breast cancer cells from blood by differential dielectric affinity. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92, (1995) 860-4). Nad separacją bakterii z przepływu były prowadzone prace przez Markx i innych (Markx G.H., Dyda P.A., Pethig R., *Dielectrophoretic separation of bacteria using a conductivity gradient. J. Biotechnol.* 51, (1996) 175-80), natomiast nad separacją komórek przez Pethinga (Pethig, *Dielectrophoresis: using inhomogeneous ac electrical fields to separate and manipulate cells. Critical Rev. Biotechnol.* 16, (1996) 331-48).

Inną grupą zagadnień badawczych, w których wykorzystuje się zjawisko dielektroforezy, są zagadnienia związane z separacją cząstek stałych z przepływu, m.in. Green i Morgan (Green N.G., Morgan H., *Dielectrophoretic separation of nano-particles. J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, (1997b) L41-4) pokazali w swojej pracy, że możliwa jest separacja cząstek mniejszych niż mikrometrowe w jednorodne podgrupy.

LDEP wykorzystywano również do wytwarzania, dozowania i manipulacji kroplami o objętości rzędu nano- i pikolitrow (Chen, C.-H., Tsai, S.-L., Jang, L.-S., *Droplet creation using liquid dielectrophoresis. Sensors and Actuators B: Chemical* (2009) 142, 369–376; Kaler, K.V.I.S., Prakash, R., Chugh, D., *Liquid dielectrophoresis and surface microfluidics. Biomicrofluidics* (2010) 4, 022805-17) przeznaczonych do analizy chemicznej i w zastosowaniach bioinżynieryjnych oraz do wytwarzania mikropęcherzyków w układach biotechnologicznych stosowanych do wykrywania i izolacji kwasów nukleinowych (Prakash, R., Kaler, K.V.I.S., *Liquid dielectrophoresis dispensing of vesicles for on-chip nucleic acid isolation and detection. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2013) 432, 42–49). Zjawisko to stosowano do wymuszania przepływu cieczy w zintegrowanych mikrosystemach cieczowych wzdłuż płaskich elektrod. Ciekawym wykorzystaniem LDEP była produkcja matryc silikonowych przez manipulację ciekłym klejem, następnie utwardzanym promieniowaniem UV (Renaudot, R.A., Agache, V., Daunay, B., Lambert, P., Kumemura, M., Fouillet, Y., Fujita, H. *Optimization of Liquid DiElectroPhoresis (LDEP) Digital Microfluidic Transduction for Biomedical Applications. Micromachines* (2011) 2, 258–273).

Ważnym elementem prac badawczych powiązanych z zjawiskiem dielektroforezy są stosunkowo nieliczne prace o charakterze podstawowym, które prowadził T.B. Jones. Zajmował się on m.in. wpływem częstotliwości napięcia zasilania na zjawisko dielektroforezy cieczy (Jones T.B., Wang K.-L., *Frequency-Dependent Electromechanics of Aqueous Liquids: Electrowetting and Dielectrophoresis. Langmuir* (2004),

20, 2813-2818).

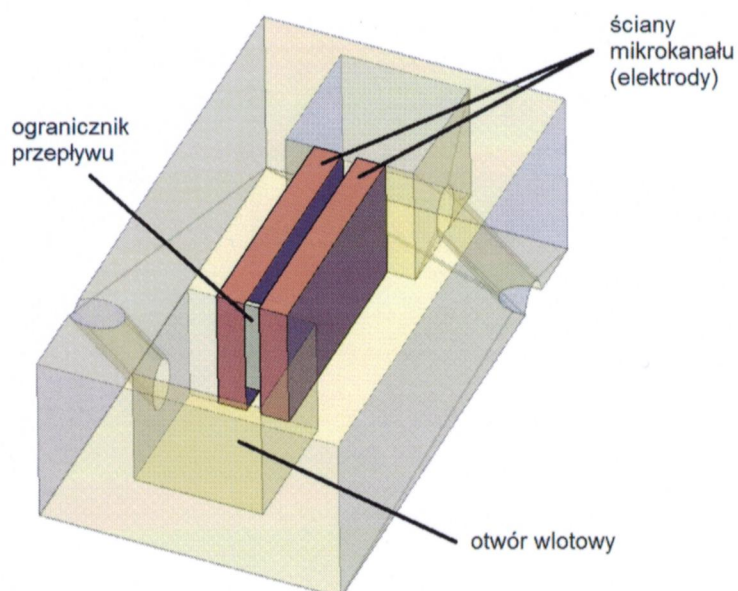
Poniżej przedstawiono w sposób skrótowy kierunki rozwoju prac badawczych związanych z dielektroforezą. Koncentrują się one w zasadzie wokół zagadnień zastosowań medycznych w zintegrowanych mikrolaboratoriach (urządzeniach „lab-on-chip”), gdzie zjawisko dielektroforezy jest używane do manipulacji krwinkami, odcierania dokładnych objętości kropli krwi (np. 60 nl) i innych zastosowań gdzie możliwość kontroli ruchu pojedynczych bakterii jest kluczowa.

Autor niniejszego autoreferatu proponował całkowicie nowe zastosowanie zjawiska dielektroforezy cieczy do kontroli natężenia przepływu w mikrokanalach o potencjalnych zastosowaniach w przemyśle samochodowym, urządzeniach energetycznych, energetyce rozproszonej, odnawialnej i wielu innych. W swoich pracach autor przeprowadził badania eksperymentalne proponowanego rozwiązania. W ramach prowadzonych prac proponował również oryginalny model wpływu proponowanego rozwiązania na przebieg procesu wrzenia w mikrokanale. Autor proponował również model szybkości podnoszenia cieczy w obszarze zjawiska dielektroforezy ciecowej pomiędzy elektrodami przewodzącymi tworzącymi kapilarę, który został zweryfikowany eksperymentalnie. Przedstawił również wyniki badań eksperymentalnych opisujących zjawisko intensyfikacji procesu skraplania czynnika niskowrzącego, gdzie wykorzystywane jest oddziaływanie siły elektrohydrodynamicznej na czynnik, są to pierwsze badania eksperymentalne z wykorzystaniem kompletnego wymiennika o wielorurowej konstrukcji (podobnej do klasycznej konstrukcji) z oddziaływaniem zewnętrznego pola elektrycznego wytworzonego pomiędzy rurami wymiennika a dodatkową elektrodą prętową.

Wszystkie opisane powyżej prace zostały w sposób bardziej szczegółowy opisane w dalszej części niniejszego autoreferatu a prace do których się ten opis odnosi zostały dołączone.

Idea wykorzystania zjawiska dielektroforezy ciecowej do kontroli natężenia przepływu

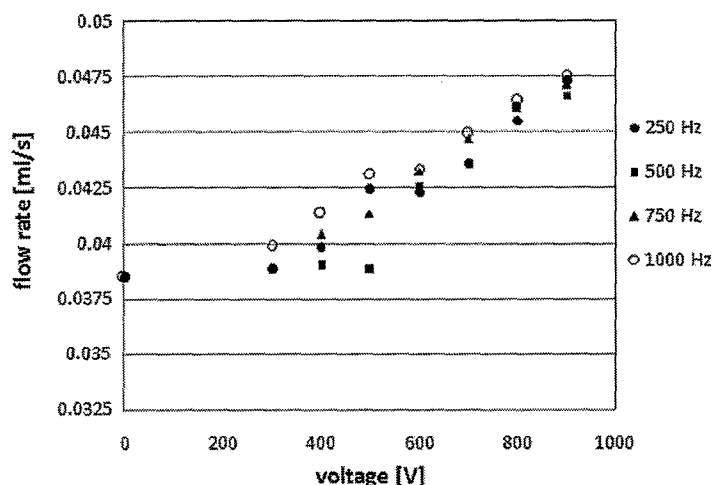
Autor proponował wykorzystanie zjawiska dielektroforezy ciecowej do kontroli natężenia przepływu poprzez rozwiązanie konstrukcyjne opisane poniżej. Rozwiązanie to uzyskało ochronę patentową co potwierdza jego oryginalność. Na rys.1 przedstawiono podstawowe elementy systemu. Dwie płasko równoległe elektrody wykonane z miedzi oddalone od siebie o kilkaset mikrometrów (od około 200µm do 400µm – dla różnych badanych mikrokanalów) tworzą mikrokanal. Do elektrod przykładane jest napięcie. Na wlocie do mikrokanalu umieszczony jest ogranicznik przepływu, w którym znajduje się otwór wlotowy umieszczony od strony dna kanału o wysokości odpowiadającej szerokości mikrokanalu. Pełni on kluczową rolę dla działania proponowanego rozwiązania. Poprzez ograniczenie wlotu do obszaru międzyelektrodowego, wytwarza się w nim powierzchnia rozdziału fazy pomiędzy powietrzem w przypadku kanału otwartego lub parami (lub wprowadzonym gazem) dla kanału zamkniętego a przepływającym czynnikiem występującym w fazie ciekłej. W przypadku przyłożenia napięcia do elektrod następuje podniesienie poziomu cieczy pomiędzy nimi, efekt ten powoduje zjawisko dielektroforezy ciecowej (podnoszenie w cieczy w takim układzie stanowi istotę doświadczenia Pellata). Wzrost poziomu cieczy powoduje powstanie impulsu ciśnienia jak i też czasowego ograniczenia natężenia przepływu. Ograniczenie na wlocie do mikrokanalu generuje poziom odniesienia. Ważnym elementem jest brak elementów ruchomych w proponowanym rozwiązaniu. Zgłoszenie patentowe opisujące przedmiotowe rozwiązanie jest dołączone do niniejszego autoreferatu wraz z decyzją o przyznaniu prawa ochrony (*M. Lackowski, Urządzenie do regulacji mikroprzepływów PL 223329*).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zaproponowanego rozwiązania.

W ramach dalszych prac przeprowadzono pomiary eksperymentalne pracy zaproponowanego rozwiązania do kontroli natężenia przepływów. W tym celu zestawiono stanowisko badawcze składające z górnego źródła cieczy generującego przepływ, w badaniach używano zbiornika umieszczonego na odpowiedniej wysokości nad mikrokanalem, który zapewniał odpowiednie natężenie przepływu lub programowalnej pompy o sterowanym natężeniu przepływu Chemyx Fusion 200. W skład stanowiska wchodził również zaproponowany kontroler przepływu, zbiornik pomiarowy który umieszczany był na wylocie z kontrolera przepływu. Do zasilania elektrod kontrolera wykorzystywano generator arbitralny napięcia (RIGOL DG1032Z) współpracujący z wzmacniaczem wysokiego napięcia (TREK 10/10B-HS), cały system był monitorowany i zarządzany z wykorzystaniem platformy NI opartej na (NI SCXI-1000). Do wizualizacji procesu użyto mikroskopów optycznych firmy NIKON Eclipse Ti-U, Eclipse TS-100F oraz szybkiej kamery z odpowiednią optyką.

Wykonano pomiary, które pokazały możliwość zastosowania opracowanego rozwiązania do kontroli natężenia przepływu (chwilowej) oraz do generacji impulsów ciśnienia do przepływu w mikrokanale. Stanowiło to podstawę do prac o charakterze modelowym jak i do badań eksperymentalnych jakie były wykonywane w ramach dalszych badań autora. Do elektrod systemu przyłożono napięcie przemiennie od 200V do 900V i częstotliwości od 250Hz do 1kHz. W badaniach wykorzystano kontroler z mikrokanalem otwartym od góry. W badaniach wykorzystano 2-propanol jako badany czynnik, ze względu na właściwości elektryczne: przenikalnością elektryczną ($\epsilon_r=19.9$), przewodnością właściwą ($\sigma = 6\mu S/m$). Na rys.2 pokazano wpływ napięcia zasilania na natężenie przepływu. Pokazuje to możliwość kontroli natężenia przepływu za pomocą zaproponowanego rozwiązania. Badania przeprowadzono również dla czynnika niskowrzącego, co wymusiło niewielką modyfikację konstrukcji regulatora przepływu. Wyniki badań opisano w artykułach których autorem lub współautorem jest M. Lackowski (M. Lackowski, A. Krupa, D. Butrymowicz, *Dielectrophoresis Flow Control in Microchannels. Journal of Electrostatics* 71 (2013) 921-925, M. Lackowski, *Dielectrophoresis Flow Control of Volatile Fluids in Microchannels. Journal of Thermal Sciences* 24 No. 5 (2015) 1-5), które zawarto w materiale stanowiącym osiągnięcie. Opisano w nich szczegółowo metodologię prowadzonych badań. Badania wykonano również dla czynnika R123, którego użytkowanie w Europie jest zabronione (poza Europą np. w Azji jest wykorzystywany) ale pokazuje on możliwość wykorzystania proponowanego rozwiązania w systemach wykorzystujących czynniki niskowrzące. Szczególnie jeśli weźmiemy pod uwagę że w większości są one dielektrykami.



Rys. 2. Zależność natężenia przepływu od przyłożonego do elektrod napięcia dla różnych częstotliwości przemiennego napięcia zasilania [B3].

Kontynuując badania nad wykorzystaniem zjawiska dielektroforezy w kontroli natężenia przepływu w mikrokanalach autor przeprowadził badania eksperymentalne i modelowe nad wpływem kontroli natężenia przepływu na proces wrzenia. Zagadnienia związane z tym obszarem zostały przedstawione w dalszej części niniejszego autoreferatu, na podstawie publikacji autora.

Badania procesu dielektroforezy cieczy

Autor prowadził również prace w obszarze badań nad samym mechanizmem podciągania cieczy dielektrycznej, wyniki badań zarówno modelowych jak i eksperymentalnych zostały zaprezentowane w artykułach M. Lackowskiego i H. Nowakowskiej (*M. Lackowski, H. Nowakowska, Numerical modelling of dielectrophoresis (DEP) effect in microchannel flow controller – comparison of calculation methods, . Przegląd Elektrotechniczny R. 92 NR 8/2016, doi:10.15199/48.2016.08.26; M. Lackowski, H. Nowakowska, Dynamics of dielectric liquid rise between parallel electrodes under capillary and dielectrophoretic forces. J. Phys. D: Appl. Phys. 51 (2018)*).

W pierwszym z wymienionych powyżej artykułów autorzy przedstawili wykonaną przez nich analizę numeryczną zjawiska dielektroforezy płynowej.

Zjawisko dielektroforezy można analizować korzystając z różnych podejść, takich jak: klasyczna termodynamika, zasada minimalizacji energii oraz podejście elektromechaniczne. Wszystkie podejścia dają zasadniczo te same wyniki, jednak podejście elektromechaniczne daje najlepszy wgląd w fizykę zjawisk zachodzących na styku ciecz-powietrze w polu elektrycznym. Z tego względu w omawianej pracy zastosowano do analizy właśnie podejście elektromechaniczne, w którym podstawową wielkością wykorzystywaną do obliczeń jest tensor napięć Maxwella. Tensor ten reprezentuje siły działające na jednostkową powierzchnię, przy czym jego składowe diagonalne odpowiadają siłom prostopadłym do powierzchni (ciśnieniom), a składowe pozadiagonalne siłom stycznym do powierzchni (naprężeniom stycznym).

W omawianej pracy wychodząc z definicji tensora Maxwella wyznaczono wzory na składowe tensora Maxwella w polu elektrycznym w kartezjańskim układzie współrzędnych (dziewięć składowych) i wyprowadzono zależność na siłę dielektroforetyczną wynikającą z obecności sił związanych z tensorem Maxwella. Wyprowadzona zależność jest słuszna w sytuacji, gdy jedna powierzchnia rozdziału ciecz-powietrze znajduje się w polu elektrycznym, zaś pozostałe powierzchnie rozdziału w obszarze bez pola elektrycznego. Zależność tę można stosować dla dowolnego rozkładu pola elektrycznego i dowolnego kształtu powierzchni rozdziału. W dalszej części pracy wykazano, że wyprowadzona zależność daje dla szczególnego przypadku jednorodnego pola elektrycznego i płaskiej powierzchni rozdziału takie same

wyniki na siłę F_{Σ} , jak zależności znane z podręczników dla tego przypadku $F_{\Sigma} = 0.5\epsilon_0(\epsilon_{\text{liquid}} - \epsilon_{\text{air}})V_0^2 w/D$.

Wykorzystując analizę tensorową przeprowadzono obliczenia wartości tenora napięć Maxwella i sił działających na powierzchni rozdziału. Obliczenia wykonano dla przypadku, gdy pole elektryczne wytworzone zostało między dwiema równoległymi płytami stanowiącymi kondensator płaski. Założono, że napięcie elektryczne jest niezmiennie w czasie, ponieważ dla analizowanego zakresu parametrów wyniki nie zależą od częstotliwości przyłożonego napięcia. Przyjęto, że odległość między płytami kondensatora wynosi $400\mu\text{m}$, a względna przenikalność elektryczna cieczy wynosi 19,9. Parametry te odpowiadają wielkościom eksperymentalnym. Obliczenia wykonano dla różnych wartości przyłożonego napięcia (w artykule przedstawiono wyniki jedynie dla wartości $V_0=300\text{V}$ i 500V) i różnych kształtów powierzchni rozdziału – odpowiadających meniskowi wklęsłemu o różnych kątach zwilżania powierzchni. Do obliczeń przyjęto bardzo gęstą siatkę obliczeniową, dokładnie odzwierciedlającą kształt powierzchni rozdziału. Wynikiem obliczeń były rozkłady potencjału i natężenia pola elektrycznego między płytami metalowymi, rozkłady gęstości sił działających na powierzchni rozdziału oraz całkowita siła działająca na powierzchnię menisku. Z obliczeń wynika, że choć rozkłady potencjału, pola elektrycznego i sił silnie zależą od kształtu powierzchni rozdziału, to całkowita siła działająca na powierzchnię rozdziału nie zależy od kształtu tej powierzchni i dla przypadku pola elektrycznego wytworzonego między równoległymi płytami, może być wyznaczona z zależności uproszczonej.

Kolejna praca M. Lackowskiego i H. Nowakowskiej (*M. Lackowski, H. Nowakowska, Dynamics of dielectric liquid rise between parallel electrodes under capillary and dielectrophoretic forces*. J. Phys. D: Appl. Phys. **51** (2018)) jest kontynuacją i rozszerzeniem badań, których wyniki zostały przedstawione w artykule omawianym powyżej. Wyniki przedstawione w pracy powyżej poświęcone były analizie zagadnień dielektroforezy w ujęciu statycznym, natomiast omawiana teraz praca poświęcona jest analizie siły dielektroforetycznej działającej na płyn (LDEP) w ujęciu dynamicznym.

W literaturze jest wiele prac, które uwzględniają siły wynikające z obecności pola elektrycznego w obszarze płynu w układach kapilarnych, jednakże prace te koncentrują się na zjawiskach elektrokapilarnych, elektroosmotycznych lub elektrozwilżaniu. Jednak tylko jedna praca poświęcona jest analizie dynamiki podnoszenia się płynu w mikrokanalach, która uwzględnia siłę LDEP, przy czym odnosi się ona do analizy krótkiego czasu, w bardzo specyficznej sytuacji ciekłego azotu w warunkach mikrograwitacji.

Omawiana tu praca jest pierwszą próbą podjęcia całościowej, ogólnej analizy dynamiki podnoszenia się płynu pod wpływem siły LDEP w mikrokanale. Przeprowadzono w niej teoretyczną, numeryczną i eksperymentalną analizę wpływu siły LDEP na czasową zależność wysokości podciągania cieczy w układzie kapilarnym utworzonym przez dwie płaskie równoległe elektrody umieszczone pionowo i zanurzone w zbiorniku o dużej objętości. Taki układ elektrod wykorzystywany jest jako element mikrokontrolera do regulacji przepływu w mikrokanalach. Znajomość czasowej odpowiedzi mikrokontrolera po przyłożeniu pola elektrycznego jest istotna, gdyż umożliwia zrozumienie zjawisk fizycznych w nim zachodzących i jego optymalizację.

Opracowano model teoretyczny, który uwzględnia działanie siły LDEP oraz sił kapilarnych f_{pf} , lepkości f_v i grawitacji f_g . Dodatkowo uwzględnia ciśnienie na wejściu do układu dwóch elektrod p_{pi} , które jest różne od ciśnienia zewnętrznego p_0 . Po wstawieniu formuł opisujących działające siły do równania zachowania pędu w postaci całkowej, w którym uwzględniono również składniki bezwładnościowe i konwekcyjne, po odpowiednich przekształceniach otrzymano równanie różniczkowe drugiego stopnia:

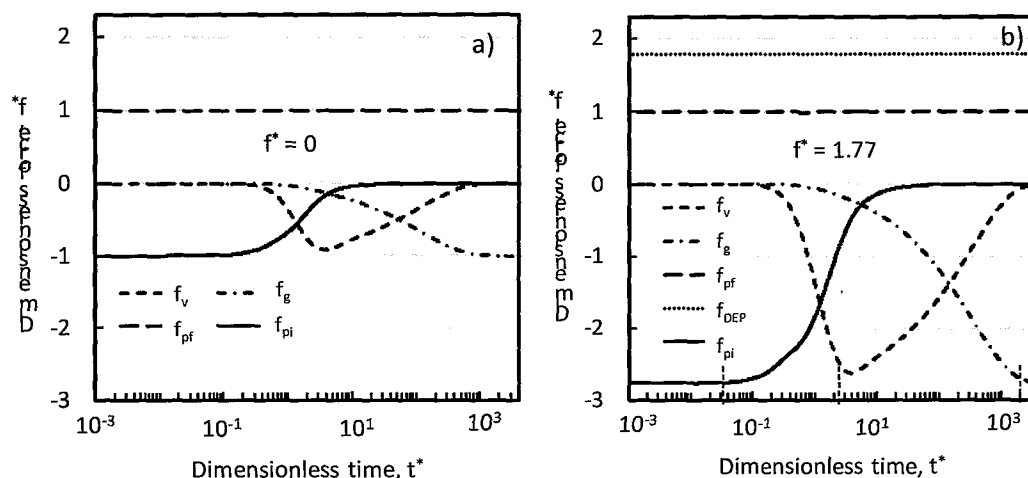
$$(h + \alpha_1)\frac{d^2h}{dt^2} + (\alpha_2 - 0.2)\left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + \left(\frac{3}{B^2}h + \alpha_3\right)\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{dh}{dt}\right) + gh - \frac{\sigma}{\rho}\left(\frac{\cos\theta_d}{B} - \frac{1}{W}\right) - \frac{P_{LDEP}}{\rho} = 0, \quad (1)$$

gdzie h jest wysokością ponoszenia się płynu, p_{LDEP} – ciśnieniem wynikającym z działania siły LDEP, $2B$ i W szerokością i długością kanału, odpowiednio, ρ , μ – gęstością i lepkością dynamiczną cieczy, σ , θ_d –

napięciem powierzchniowym i kątem zwilżania, współczynniki α_i są wielkościami wyznaczonymi teoretycznie dla zadanego kształtu kanału.

Ciśnienie p_{LDEP} , zdefiniowane jako powierzchniowa gęstość siły dielektroforetycznej, zostało wyznaczone wykorzystując formalizm tensora Maxwella, który daje najlepszy wgląd w zjawiska fizyczne zachodzące na styku powierzchni rozdziału. Ponieważ w przypadku podciągania kapilarnego powierzchnia cieczy nie jest równoległa do linii sił pola elektrycznego, dodatkowo wyznaczono rozkłady potencjału i pola elektrycznego w przestrzeni między elektrodami dla różnych wartości kąta zwilżania i kształtu menisku. Analiza tego zjawiska oraz to, że siła LDEP nie zależy od kształtu menisku; mimo że rozkłady pola elektrycznego mogą się znacznie różnić, są nowościami w literaturze naukowej.

Równanie (1) rozwiązano numerycznie i przeanalizowano dla postaci bezwymiarowej (z unormowanymi wielkościami), dzięki czemu uzyskane wyniki można wygodniej interpretować i porównywać z wynikami uzyskanymi dla rozmaitych warunków eksperymentalnych. Wyznaczono czasowe zmiany wszystkich sił działających na ciecz, prędkości podnoszenia i wysokości płynu do momentu uzyskania stanu stacjonarnego dla różnych wartości przyłożonego napięcia. Obliczenia wykonano dla dwóch warunków początkowych określających poziom cieczy między elektrodami: (i) poziom taki, jak w zewnętrznym zbiorniku, $h(0) = 0$, (ii) poziom taki, jaki wynika z równowagi sił pod działaniem sił kapilarnych, $h(0) = h_{cap}$.

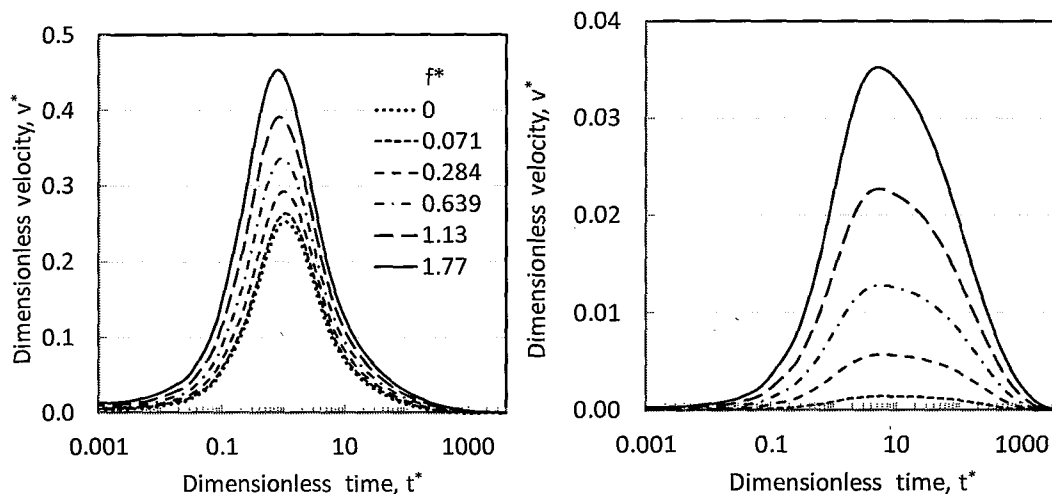


Rys. 3. Siły działające na powierzchnie cieczy dla warunku początkowego (i); (a) bez siły dielektroforetycznej, (b) z siłą dielektroforetyczną [B5].

Stwierdzono, że proces podnoszenia się płynu można podzielić na cztery etapy w zależności od aktualnych wartości sił (rys. 3): w pierwszym etapie dominują siły o stałej wartości (kapilarna f_{pi} , dielektroforetyczna f_{DEP} , i f_{pi} wynikająca z ciśnienia na wejściu), w drugim etapie pojawia się siła lepkości f_v , a wysokość zmienia się jak $\sim t^2$, w trzecim etapie istotna staje się siła grawitacji f_g ; czwarty etap to osiągnięcie równowagi wszystkich sił. Wartości wszystkich sił (oprócz kapilarnej) są większe dla przypadku, gdy przyłożone jest napięcie.

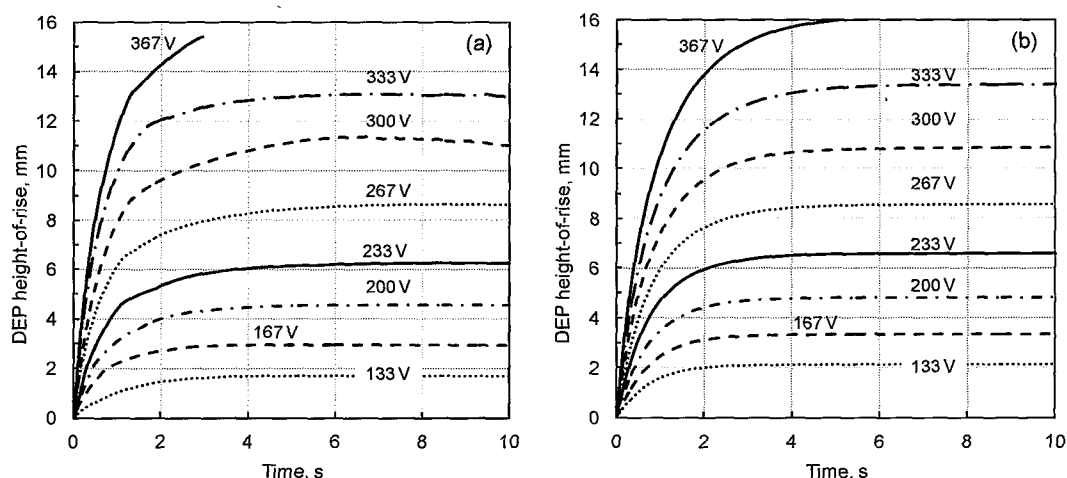
Wyznaczono zmiany w czasie prędkości podciągania (rys. 4). Maksymalna prędkość rośnie, gdy przyłożone napięcie rośnie i jest większa dla przypadku (i). Dla tego przypadku maksimum osiągane jest wcześniej niż dla przypadku (ii).

Obliczenia pokazują, że przez zmianę napięcia przyłożonego do elektrod można efektywnie modyfikować i zmieniać w czasie poziom cieczy między elektrodami.



Rys. 4. Prędkość podciągania w zależności od czasu dla różnych wartości przyłożonego napięcia elektrycznego; (lewy) przypadek $h(0) = 0$, (prawy) przypadek $h(0) = h_{cap}$ [B5].

Przeprowadzono prace eksperymentalne polegające na wyznaczeniu wysokości cieczy w zależności od napięcia między elektrodami w mikrokanale o szerokości $2B = 0.4$ mm. Spośród wielu testowanych cieczy do eksperymentu został wybrany izopropanol, ze względu na to, że wyróżnia się względnie wysoką przenikalnością elektryczną ($\epsilon_r = 19.9$), dzięki czemu efekt dielektroforetyczny jest wyraźny i niską przewodnością właściwą ($\sigma = 6 \mu S/m$), dzięki czemu nie dochodzi do przegrzewania się i wrzenia cieczy przy stosowanych napięciach. Znalezienie cieczy o takich właściwościach jest również osiągnięciem autora. Zgodność wyników eksperymentalnych i teoretycznych szybkości podnoszenia się cieczy okazała się bardzo dobra, co pokazane jest na Rys.5.



Rys. 5. Wysokość podciągania izopropanolu w zależności od czasu dla różnych wartości przyłożonego napięcia: (a) eksperyment, (b) teoria [B6].

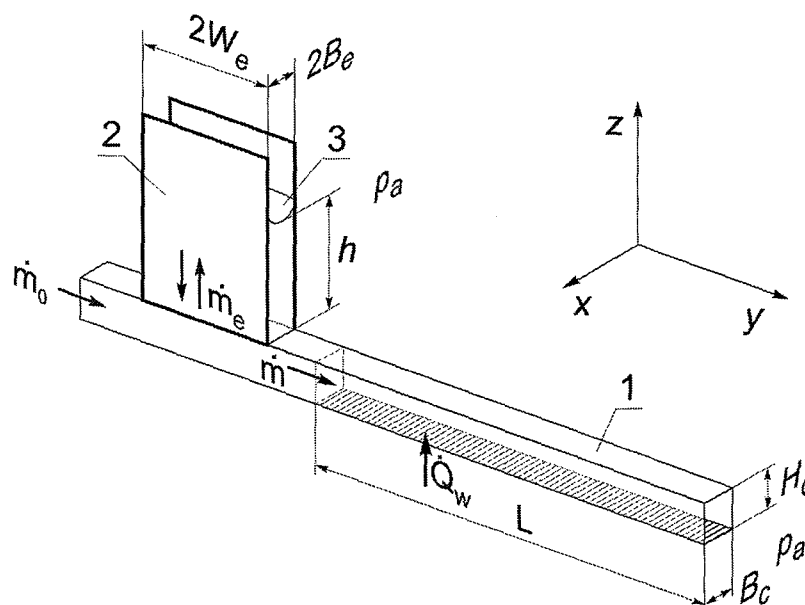
Pewnym uzupełnieniem wyników badań eksperymentalnych podnoszenia cieczy w obszarze międzyelektrodowym z przyłożonym do nich napięciem przedstawionych w poprzednim artykule, są

wyniki przedstawione w pracy M. Lackowskiego i J. Karwackiego (M. Lackowski, J. Karwacki, *Experimental analysis of the DEP forces influence on temporal height-of-rise in a capillary system for boiling control in microchannel. XVI International Conference on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy 2016 p. 201-206*).

Badania zastosowania dielektroforezy cieczy

W dalszej części autoreferatu autor koncentruje się w zasadniczej części na badaniach numerycznych i eksperymentalnych wpływu opracowanej metody kontroli natężenia przepływu na procesy przepływu i wrzenia w mikrokanalach. Podczas pracy mikrokanalowych wymienników ciepła w charakterze parowników jednym z problemów są hydrodynamiczne niestabilności przepływu oraz nierówny podział całkowitego natężenia przepływu między poszczególne mikrokanaly wymiennika. Jako że czynnikiem roboczym jest w nich często dielektryk, do sterowania przepływem można wykorzystać działanie pola elektrycznego, a w szczególności siły dielektroforetycznej cieczy (LDEP). Prace o charakterze modelowym opisujące wpływ zastosowania kontrolera przepływu opartego na wykorzystaniu siły dielektroforetycznej cieczy (LDEP) zostały szczegółowo przedstawione w pracy M. Lackowskiego i R. Kwidzińskiego (M. Lackowski, R. Kwidziński *Dynamic Modelling of the DEP Controlled Boiling in a Microchannel, Journal of Thermal Sciences 27 No. 2 (2018) 167-174*). Przedstawiony w niniejszej pracy model jest to według wiedzy autora pierwszym oryginalnym modelem opisującym oddziaływanie kontrolera natężenia przepływu wykorzystującego siłę dielektroforetyczną cieczy (LDEP) na proces wrzenia w mikrokanale.

Dynamiczne charakterystyki przepływu w kontrolerze LDEP i w połączonym z nim ogrzewanym mikrokanalem zostały zbadane przy pomocy modelu matematycznego o parametrach skupionych w niniejszym artykule. Z analizy niestacjonarnego bilansu pędu uzyskano m.in. równanie opisujące zmiany wysokości słupa cieczy w kontrolerze LDEP. Schemat badanego układu dynamicznego przedstawiono na rys. 6.



Rys.6. Schemat modelowanego układu dynamicznego: 1 – ogrzewany mikrokanal, 2 – kontroler dielektroforetyczny (LDEP), 3 – menisk. Zaznaczono też najważniejsze wymiary układu, masowe strumienie przepływu $\dot{m}$, dostarczany strumień ciepła $\dot{Q}_w$ i przyjęty układ współrzędnych [B7].

Kontroler LDEP jest zbudowany z dwóch, pionowych i równoległych elektrod o szerokości $2W_e$, tworzących szczelinę o szerokości $2B_e$. Są one umieszczone nad wlotową częścią mikrokanalu o szerokości

$B_c = 2B_e$, wysokości H_c i polu przekroju poprzecznego $A_c = B_c H_c$. Jedna ze ścianek mikrokanalu jest jednorodnie ogrzewana na odcinku o długości L , położonym (z punktu widzenia przepływu) za kontrolerem LDEP. Wskutek działania sił kapilarnych i LDEP, szczelina między elektrodami jest wypełniona cieczą do wysokości h . Do układu dopływa stały strumień cieczy o wydatku masowym $\dot{m}_0$, z którego część może kierować się do kontrolera przez jego podstawę o przekroju wlotowym $A_e = 4B_e W_e$. Dlatego wartość wydatku $\dot{m}$ w mikrokanale za kontrolerem może być zmienna, podobnie jak ciśnienie p_i na wlocie do części ogrzewanej mikrokanalu. Wylot mikrokanalu, a także górna i boczne krawędzie elektrod kontrolera, są otwarte do otoczenia o ciśnieniu p_a .

Analiza całkowitego pędu P_{tot} dla przepływu cieczy w objętości kontrolnej $V_e = 2B_e \times 2W_e \times h$, obejmującej ciecz w przestrzeni między elektrodami kontrolera LDEP, prowadzi do następującego bilansu

$$\frac{dP_{tot}}{dt} = \dot{P}_{conv} + F_{vis} + F_{pf} + F_{pi} + F_{grav} + F_{DEP}. \quad (2)$$

gdzie $\dot{P}_{conv}$ oznacza strumień pędu wskutek ogólnego ruchu płynu (konwekcja) w kontrolerze, a kolejne składniki uwzględniają działanie sił lepkości na ściankach kontrolera F_{vis} , siły ciśnieniowej działającej na szczycie słupa cieczy F_{pf} , siły ciśnieniowej działającej u podstawy kontrolera F_{pi} , siły ciężkości F_{grav} i siły dielektroforetycznej F_{DEP} .

Poszczególne człony bilansu (2) zostały wyznaczone przy założeniu jednowymiarowego ruchu cieczy w kontrolerze (w kierunku osi z), nieściśliwego i laminarnego, z parabolicznym rozkładem prędkości v_z . Otrzymano:

$$P_{tot} = \iiint_{V_e} \rho_L v_z dV_e = \int_0^h \int_{-W}^W \int_{-B}^B \rho_L v_z dx dy dz = A_e h \rho_L u, \quad (3)$$

$$\dot{P}_{conv} = - \iint_{A_e} \rho_L v_z^2 dA_e = - \int_{-W}^W \int_{-B}^B \rho_L v_z^2 dx dy = A_e \rho_L \cdot \frac{6}{5} u^2, \quad (4)$$

$$F_{vis} = 2 \int_0^h \int_{-W}^W \left(\mu_L \frac{dv_z}{dx} \right)_{x=\pm B} dy dz = -A_e \mu_L \cdot \frac{3}{B_e^2} h u, \quad (5)$$

$$F_{pf} = \iint_{A_e} (p_{cap} - p_a) dA_e = A_e (p_{cap} - p_a), \quad (6)$$

$$F_{pi} = - \iint_{A_e} p_i dA_e = -A_e p_i, \quad (7)$$

$$F_{grav} = - \iiint_{V_e} \rho_L g dV_e = -A_e \rho_L g h. \quad (8)$$

gdzie $u(t) = dh/dt$ jest prędkością frontu przepływu, zależną od wysokości słupa cieczy h w kontrolerze LDEP. Ponadto, ρ_L i μ_L oznaczają gęstość i lepkość cieczy, a p_{cap} jest ciśnieniem cieczy na górnym menisku, określonym równaniem Younga–Laplace'a

$$p_{cap} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \sigma \left(\frac{\cos \theta_d}{B_e} - \frac{1}{W_e} \right), \quad (9)$$

gdzie σ jest napięciem powierzchniowym. Główne promienie krzywizny menisku, R_1 i R_2 , zostały określone w uproszczeniu jako $R_1 = B_e / \cos \theta_d$ i $R_2 = -W_e$ (θ_d jest dynamicznym kątem zwilżania).

Siła dielektroforetyczna F_{DEP} w (1) jest równa

$$F_{DEP} = A_e \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) V^2}{8 B_e^2}, \quad (10)$$

gdzie ϵ_0 to przenikalność elektryczna próżni, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna cieczy a V jest potencjałem elektrycznym pomiędzy elektrodami.

Ciśnienie p_i u podstawy kontrolera LDEP jest takie samo jak na wlocie do kanału ogrzewanego. Zostało ono wyznaczone z globalnego bilansu pędu dla części ogrzewanej mikrokanalu, w której założono

istnienie jednorodnego przepływu dwufazowego. Odpowiednie równanie bilansowe przyjmuje postać podobną do (2), a mianowicie

$$\frac{dP_{tot}}{dt} = \dot{P}_{conv} + F_{pi} + F_{pe} + F_{vis}. \quad (11)$$

Całkowanie poszczególnych członów (11) w objętości kontrolnej V_c , daje w wyniku następujące wyrażenia

$$P_{tot} = \iiint_{V_c} \rho w dV_c = A_c \rho w L = \dot{m} L, \quad (12)$$

$$\dot{P}_{conv} = \iint_{A_c} (\rho_i w_i^2 - \rho_e w_e^2) dA_c = A_c (\rho_i w_i^2 - \rho_e w_e^2) = \frac{\dot{m}_i^2}{A_c \rho_i} - \frac{\dot{m}_e^2}{A_c \rho_e}. \quad (13)$$

$$F_{pi} + F_{pe} = \iint_{A_c} (p_i - p_e) dA_c = A_c (p_i - p_e) = A_c (p_i - p_a), \quad (14)$$

$$F_{vis} = -A_c \Delta p_f. \quad (15)$$

gdzie $A_c = A_i = A_e$ jest (stałym) polem przekroju mikrokanłu, a L jego długością, mierzoną między przekrojami kontrolnymi A_i na wlocie i A_e na wylocie. Średnie chwilowe wartości gęstości i prędkości w mikrokanale oznaczono jako ρ i w , a $\dot{m}$ jest średnim wydatkiem masowym w części ogrzewanej mikrokanłu, zależnym od wydatku pompy $\dot{m}_0$ i wydatku w kontrolerze LDEP $\dot{m}_e$,

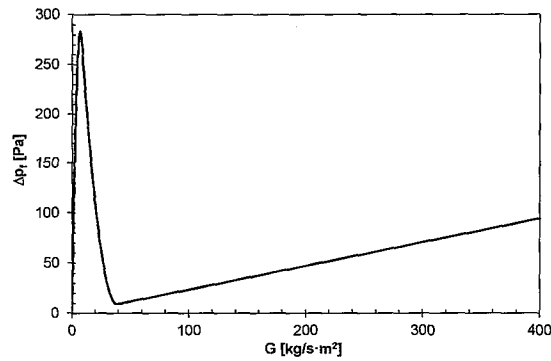
$$\dot{m} = A_c \rho w = \dot{m}_0 - \dot{m}_e. \quad (16)$$

Opory hydrauliczne przepływu Δp_f w kanale ogrzewanym, występujące w (15) zostały wyznaczone przy założeniu, że podczas wrzenia udział masowy fazy parowej (stopień suchości) zmienia się liniowo wzdłuż długości kanału. Opis matematyczny Δp_f , ze względu na jego obszerność, zostanie tutaj pominięty. Należy zwrócić jednak uwagę, że w obszarze wrzenia, opory Δp_f maleją ze wzrostem wydatku, co przedstawiono na rys. 7. Taki charakter oporów jest źródłem niestabilności Ledinegga.

Podstawiając zależności (12÷15) do równania (11) uzyskuje się bilans pędu dla ogrzewanego mikrokanłu w postaci

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = -A_e \rho_L \frac{du}{dt} = \frac{A_c}{L} [p_i - p_a - \Delta p_f], \quad (17)$$

z którego można wyznaczyć ciśnienie p_i panujące u podstawy kontrolera LDEP.



Rys. 7. Zmiana oporów hydraulicznych przepływu Δp_f w funkcji gęstości strumienia masy G [B7].

Po podstawieniu ciśnienia p_i uzyskanego z (17) do (7), a następnie wyrażen (3÷8) do równania (2) uzyskuje się

$$\left(h + \frac{A_e}{A_c} L \right) \frac{du}{dt} = \frac{u^2}{5} - \frac{3\mu_L}{B_e^2 \rho_L} hu - gh + \frac{p_{cap} + \Delta p_f + p_{DEP}}{\rho_L}, \quad (18)$$

gdzie

$$u = \frac{dh}{dt}. \quad (19)$$

Jest to równanie, które opisuje dynamikę rozważanego system złożonego z kontrolera LDEP i ogrzewanego mikrokanalu.

Równanie modelowe (18) zostało wykorzystane do analizy wrzenia izopropanolu (2-propanolu) w mikrokanale z kontrolerem LDEP, w układzie przedstawionym na rys. 6. Obliczenia wykonano przyjmując wymiary $B_c = H_c = 2B_e = 400\mu\text{m}$, $W_e = 8\text{mm}$. Symulowano przepływy przy różnych wartościach mocy grzejnej $\dot{Q}_w$ i napięcia V między elektrodami kontrolera. Założono, że analizowany układ pracuje przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym p_a , przy którym temperatura wrzenia izopropanolu wynosi 355.35 K (82.2°C). Temperatura cieczy podawanej przez pompę wynosiła 298.15 K (25°C) a jej wydatek $\dot{m}_0 = 1.3 \cdot 10^{-6}$ kg/s (wydatek objętościowy wynosił wtedy 0.1 ml/min). Ze względu na dużą zwilżalność izopropanolu przyjęto, że dynamiczny kąt zwilżania θ_d jest zawsze równy 0 rad.

Pośród szeregu wykonanych symulacji, których pełny opis można znaleźć w oryginalnym artykule, najciekawsze wyniki uzyskano dla wrzenia w mikrokanale, kiedy napięcie przykładane do elektrod kontrolera LDEP jest włączane lub wyłączane w zależności od kierunku przepływu w części ogrzewanej. W takim przypadku równanie modelowe (18) rozwiązywano numerycznie dla następującego warunku początkowo-brzegowego:

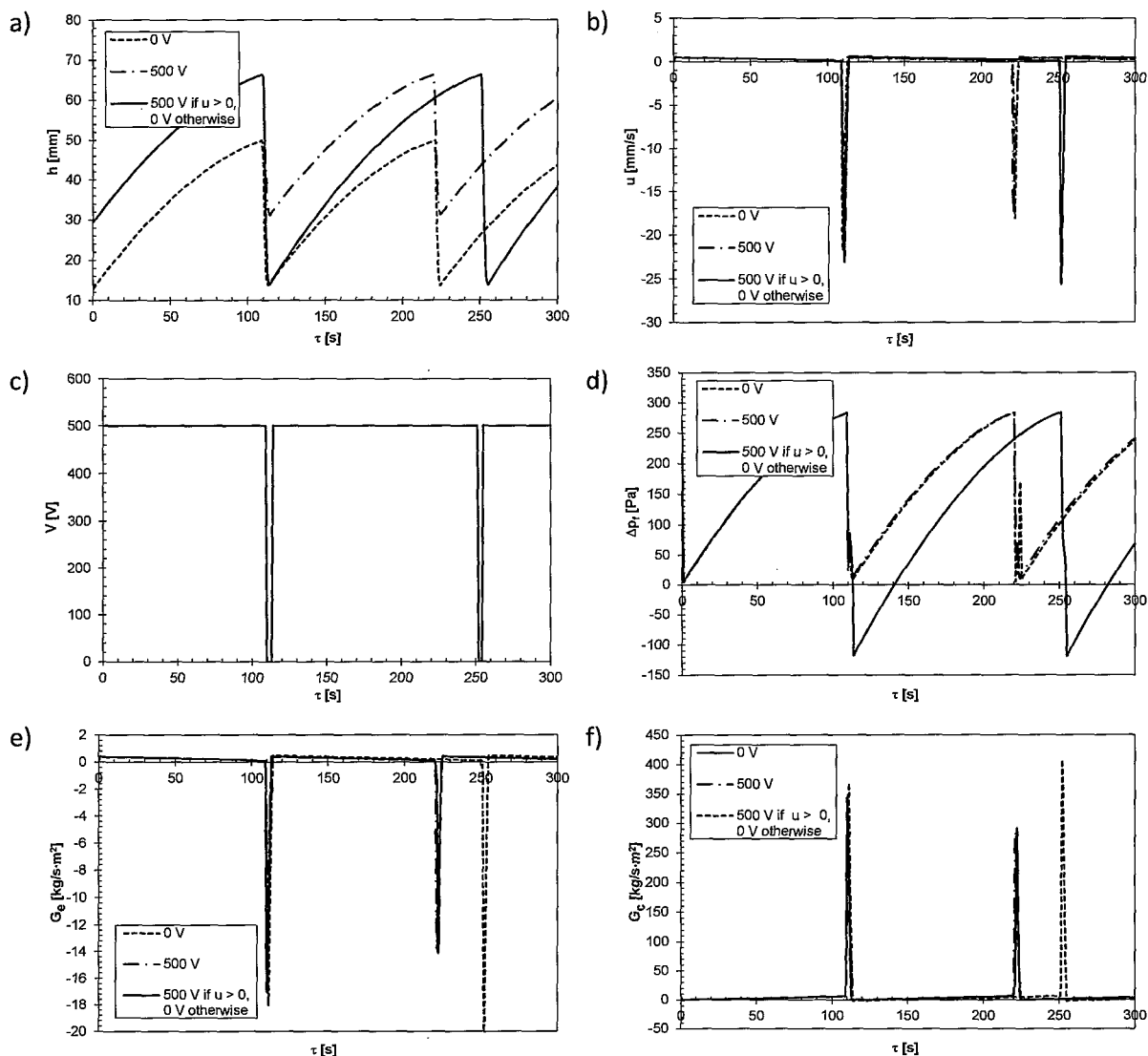
$$h(t=0) = h_{cap}(t=0) + h_{DEP}(t=0), \quad (20a)$$

$$u(t=0) = 0, \quad (20b)$$

$$V(t) = \begin{cases} 500 \text{ V} & \text{gdy } u > 0 \\ 0 \text{ V} & \text{gdy } u \leq 0 \end{cases}. \quad (20c)$$

Otrzymane rezultaty przedstawiono na rys. 8, na którym dla porównania dodano także rozwiązanie modelu dla stałych i nieprzerwywanych wartości napięcia V , równych 0 i 500 V. Wartość strumienia ciepła $\dot{Q}_w$ została tak dobrana, że ciecz przepływająca w warunkach stacjonarnych powinna całkowicie odparować gdy osiągnie wylot z mikrokanalu. Jednak, jak już wspomniano, ze względu na charakter oporów hydraulicznych, uzyskanie przepływu stacjonarnego jest niemożliwe z powodu pojawienia się niestabilności Ledinegga.

Na podstawie przebiegów czasowych przedstawionych na rys. 8 można stwierdzić, że w chwili gdy opory przepływu Δp_f osiągają wartość maksymalną na swojej charakterystyce (rys. 7), obraz przepływu ulega gwałtownej zmianie. W prezentowanej symulacji zjawisko to po raz pierwszy pojawia się w chwili $\tau = 110$ s. Wtedy, na przykład, słup cieczy w kontrolerze LDEP szybko opada (rys. 8a). Potem, ciecz w kontrolerze powoli podnosi się, aż do chwili gdy ponownie zostanie osiągnięte maksimum Δp_f , kiedy to znowu ciecz szybko opada. Takie wahania słupa cieczy i innych parametrów przepływu w badanym układzie powtarzają się w regularnych odstępach czasu. Jeżeli do elektrod kontrolera LDEP jest przyłożone napięcie o stałej wartości, okres tych oscylacji praktycznie nie zależy od wartości przyłożonego napięcia. Tylko maksymalna osiągnięta wysokość słupa cieczy rośnie wraz z wielkością napięcia. Obraz ten zmienia się, gdy napięcie jest wyłączane kiedy poziom cieczy w kontrolerze opada. Wtedy ciecz obniża się za każdym razem do poziomu wynikającego z działania tylko sił kapilarnych. Dzięki temu objętość cieczy wypływającej z kontrolera do mikrokanalu ogrzewanego jest największa dla danej kombinacji wymiarów kontrolera i amplitudy przykładanego napięcia. W rezultacie częstość oscylacji wynikających z niestabilności Ledinegga ulega zmniejszeniu.



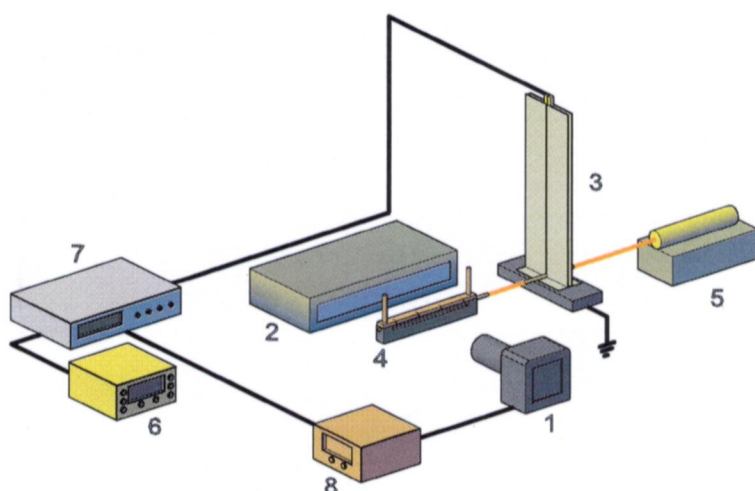
Rys. 8. Parametry opisujące przepływ w kontrolerze LDEP i ogrzewanym mikrokanale obliczone z równania modelowego (18) z warunkami (20). Pokazane przebiegi czasowe zostały obliczone dla trzech profile napięcia V : a) wysokość słupa cieczy w kontrolerze LDEP, b) prędkość przepływu w kontrolerze LDEP, c) wartość napięcia zależna od kierunku prędkości u , d) tarcowy spadek ciśnienia w mikrokanale ogrzewanym, e) gęstość strumienia masy w kontrolerze LDEP, f) gęstość strumienia masy w mikrokanale ogrzewanym [B7].

Podsumowując w artykule autorzy potwierdzili, że można wpływać na przebieg wrzenia w ogrzewanym mikrokanale poprzez umieszczenie przed jego wlotem kontrolera LDEP. W takim układzie, amplituda napięcia przykładanego w kontrolerze powinna być sterowana kierunkiem ruchu cieczy między jego elektrodami. Aby efekty działania kontrolera miały istotny wpływ na przebieg wrzenia, generowane zmiany wysokości cieczy w kontrolerze powinny być na tyle duże, aby pokonać opory hydrauliczne w ogrzewanym mikrokanale.

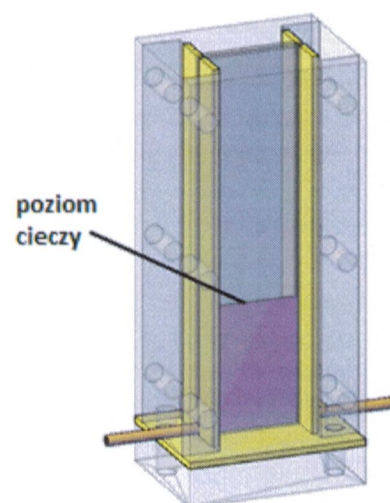
Przedstawione powyżej rozważania oparte na zaproponowanym modelu numerycznym uzupełniono badaniami o charakterze eksperymentalnym, które zostały przedstawione w pracy autorstwa M. Lackowskiego, R. Kwidzińskiego, J. Karwackiego i T. Przybylińskiego (*M. Lackowski, R. Kwidzinski, J. Karwacki, T. Przybyliński, Experimental observations of flow structures during DEP controlled boiling in a microchannel, Archives of Thermodynamics Vol. 38(2018), No. 1, 125–141 doi: 10.1515/aoter-2018-0007*).

Artykuł omawia wyniki eksperymentalnych obserwacji struktur przepływu podczas wrzenia w mikrokanale, w którym przepływ był kontrolowany przy pomocy kontrolera dielektroforetycznego (LDEP). Wykorzystany w badaniach kontroler zbudowany był z dwóch płytek miedzianych - elektrod, umieszczonych równolegle do siebie w odległości $200\text{ }\mu\text{m}$, tworzą one pionowy mikrokanal o przekroju $200\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ mm}$. Ciecz dostaje się między elektrody przez umieszczone u ich podstawy otwory wlotowe i wylotowe o wymiarach $200 \times 200\text{ }\mu\text{m}$. Do elektrod przykładane było napięcie elektryczne, które powodowało zmiany wysokości słupa cieczy w kontrolerze. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 9a i 9b.

Do kontrolera LDEP wpływał stały strumień cieczy generowany przez precyzyjną pompę infuzyjną. Ciecz wypływająca z kontrolera trafiała do ogrzewanego mikrokanalu, w którym obserwowano przebieg wrzenia. Ten mikrokanal, o długości 130 mm i przekroju kwadratowym $400 \times 400\text{ }\mu\text{m}$, został wyfrezowany w płytce poliwęglanowej. Dzięki temu pojawiające się w nim struktury przepływu dwufazowego mogły być obserwowane i rejestrowane przy pomocy szybkiej kamery. Jedną ze ścianek mikrokanalu tworzył pasek folii oporowej (inconel), który był rozgrzewany prądem pochodzącym z regulowanego zasilacza PowerLab 3030D. Pomiar temperatur zapewniało 6 termopar (Czaki TP-221K-B-200), a ciśnienie różnicowe między wlotem a wylotem ogrzewanego mikrokanalu mierzono przy pomocy przetwornika Endress+Hauser Deltabar S PMD75. Jego wskazania zerowano na początku każdej sesji pomiarowej, gdy w mikrokanale miał miejsce ustalony przepływ cieczy przechłodzonej (poniżej stanu nasycenia).



Rys. 9a. Schematyczny widok stanowiska badawczego: 1 – szybka kamera wideo (MICROTRON MC1310), 2 – liniowa lampa LED I (CCS LNSP-200 SW), 3 – kontroler LDEP – kontroler przepływu, 4 – ogrzewany mikrokanal, 5 – strzykawkowa pompa infuzyjna (Chemyx Fusion 200), 6 – generator arbitralny napięcia (RIGOL DG1032Z), 7 – wzmacniacz wysokiego napięcia (TREK 10/10B-HS), 8 – system sterujący i akwizycja danych pomiarowych (NI SCXI-1000). [B8]



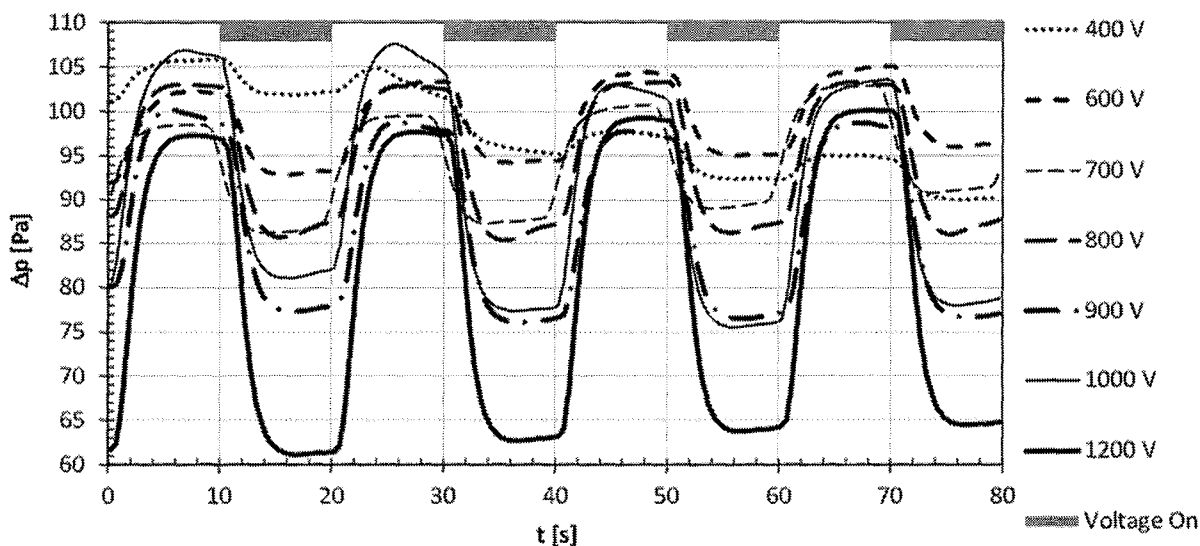
Rys. 9b. Budowa badanego kontrolera LDEP wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych wpływu jego działania na proces wrzenia. [B8]

Wylot ogrzewanego mikrokanalu był otwarty do otoczenia, podobnie jak górne krawędzie elektrod kontrolera, obserwowane zjawiska zachodziły przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego. Jako ciecz roboczą do badań wybrano isopropanol (2-propanol), który przy ciśnieniu atmosferycznym wrze w temperaturze 355.4 K (82.3°C).

Wykonane badania eksperymentalne koncentrowały się na obserwacjach zmienności struktur dwufazowych w ogrzewanym mikrokanale, które były powodowane zmianami siły LDEP w kontrolerze wskutek przykładania napięcia o wybranej amplitudzie i czasie trwania. Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane dzięki rejestracji ruchu pęcherzyków i korków parowych, zsynchronizowanej z zapisem napięcia przykładanego do elektrod kontrolera i ciśnienia różnicowego na końcach ogrzewanego mikrokanalu. Zapis wideo struktur wrzącego przepływu został przekształcony na czarno-białą mapę przepływu, która pokazuje

przestrzenny i czasowy rozkład fazy ciekłej i parowej w mikrokanale. Na takiej mapie, której przykład pokazuje rys. 11, białe obszary reprezentują części mikrokanалу zajęte przez pęcherzyk lub korek parowy, natomiast czarne fragmenty oznaczają obszary zajęte przez ciecz. Na współrzędnej poziomej odłożono czas obserwacji, a na pionowej – odległość od wlotu do ogrzewanego mikrokanалу. Pęcherzyk poruszający się wzdłuż mikrokanалу będzie odzwierciedlony na mapie przepływu przez białą linię, pochyloną w prawo pod kątem zależnym od prędkości pęcherzyka. Wobec tego, stacjonarne pęcherzyki lub korki będą odzwierciedlone jako linie poziome. Szerokość tej linii, mierzona w pionie, jest równa średnicy pęcherzyka. Dla korków parowych szerokość ta może się zmieniać, odpowiednio do zmian długości korka w mikrokanale.

Podczas badań napięcie przykładane do elektrod kontrolera było włączane cyklicznie na 10 sekund, z przerwami trwającymi również 10s. Na mapie przedstawiono dwa takie cykle, a chwila zerowa odpowiada momentowi włączenia napięcia. Maksymalna amplituda przykładanego napięcia przyjmowała wybrane wartości od 0 do ± 1200 V (2400 Vpp). Pomiary wykonano dla dwóch wartości wydatku cieczy nastawionego na pompie infuzyjnej, równych 0.05 i 0.2 ml/min. Dalej omówiono najważniejsze wyniki uzyskane dla wydatku 0.05 ml/min. Rezultaty dla 0.2 ml/min są jakościowo podobne. Gęstość strumienia ciepła na ogrzewanej ścianie oszacowano odpowiednio na 25 W/m^2 i 34 W/m^2 dla dwóch wymienionych wartości wydatku.

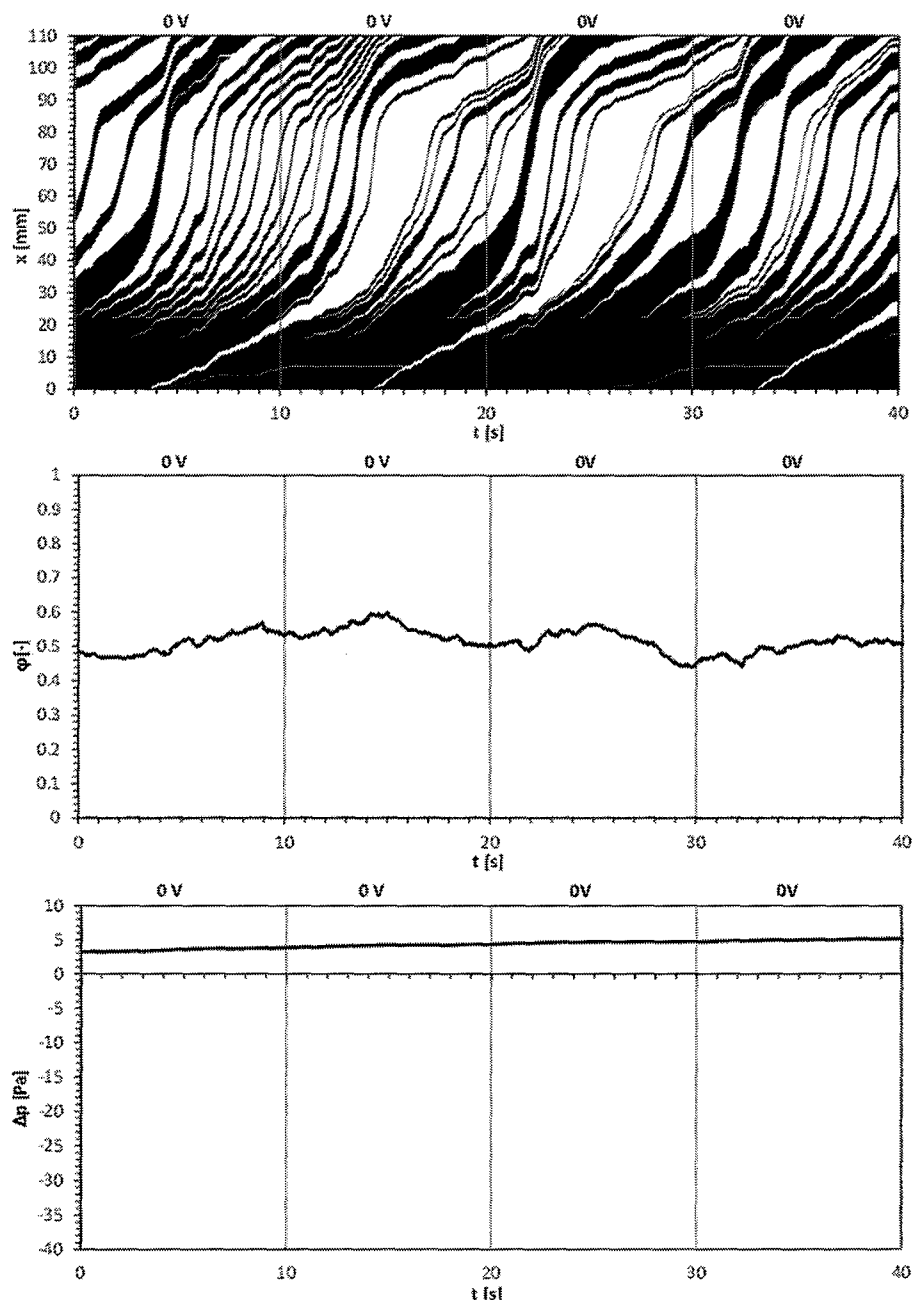


Rys. 10. Przebiegi ciśnienia różnicowego Δp zmierzonego między wlotem a wylotem ogrzewanego mikrokanалу dla różnych wartościach napięcia przykładanego z przerwami do elektrod kontrolera LDEP przy wydatku pompy równym 0.05 ml/min [B8].

Na rys. 10 przedstawiono zmierzone ciśnienie różnicowe Δp między końcami ogrzewanego mikrokanалу przy różnych wartościach napięcia przykładanego z przerwami do elektrod kontrolera DEP. Dziesięciosekundowe okresy, gdy napięcie było włączone, zaznaczono na wykresie szarymi paskami. Jak widać, włączenie napięcia powoduje szybki spadek Δp , a następnie powrót do poprzedniej wartości po każdorazowym wyłączeniu napięcia. Amplituda tych zmian Δp rośnie ze wzrostem maksymalnej wartości napięcia.

Rys. 11 przedstawia wyniki uzyskane dla przepływu dwufazowego w mikrokanale, gdy w kontrolerze LDEP nie przyłożono do elektrod napięcia elektrycznego. Na mapie przepływu można zauważyć, że większość pęcherzyków pary powstaje w zarodku nukleacji położonym w odległości 22 mm od wlotu do mikrokanалу, chociaż kilka pęcherzyków istniało już na tym wlocie. Wszystkie one przemieszczają się w kierunku wylotu z kanału, rosną i przekształcają się w korki parowe. Długość tych korków jest największa w środkowej części mikrokanалу i nieco maleje wskutek częściowej kondensacji w części wylotowej. Na podstawie mapy przepływu obliczono rozkład czasowy średniego stopnia zapełnienia,

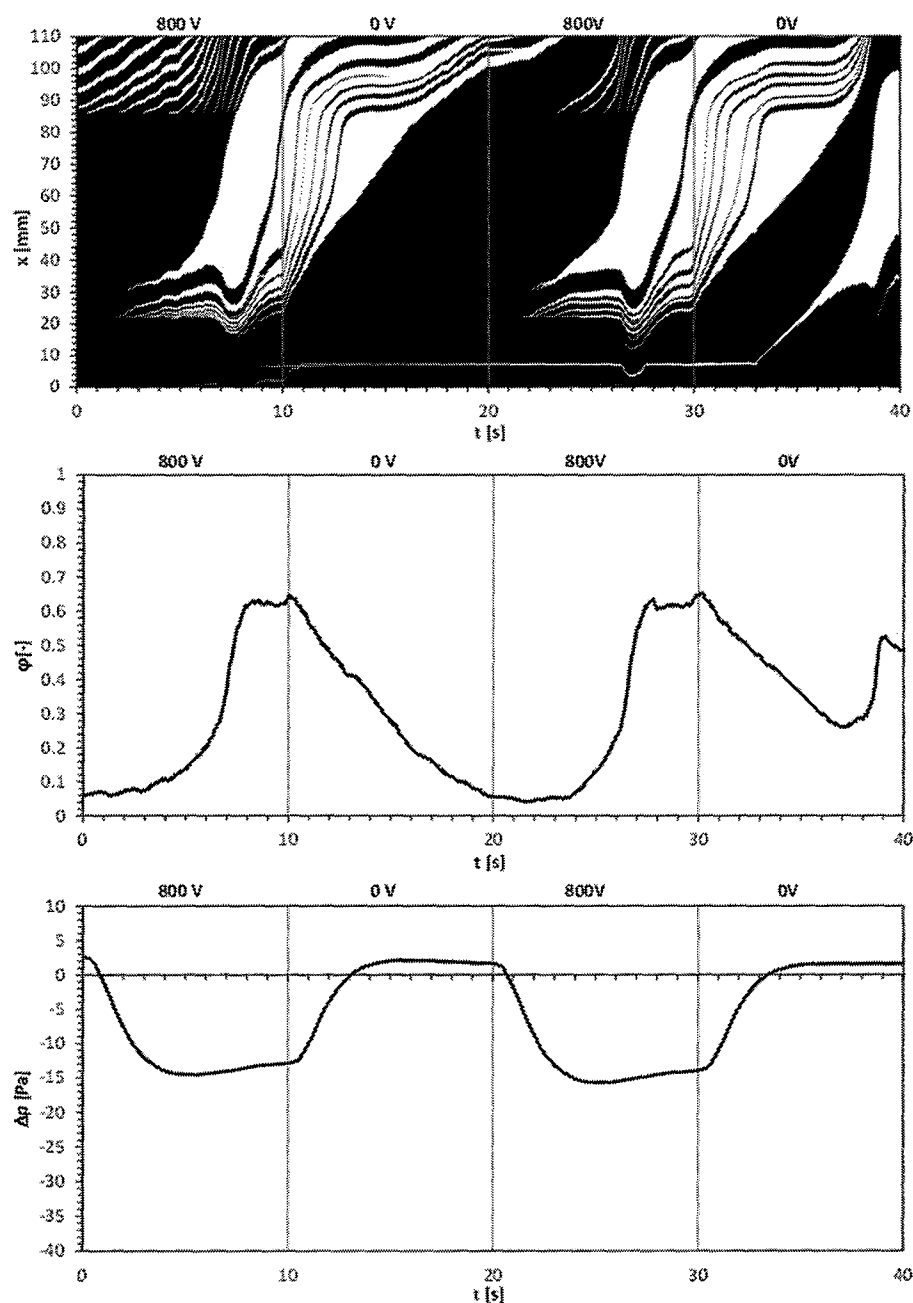
który nieznacznie oscyluje w okolicy wartości 0.5. Zmierzone ciśnienie różnicowe jest także prawie niezmiennie.



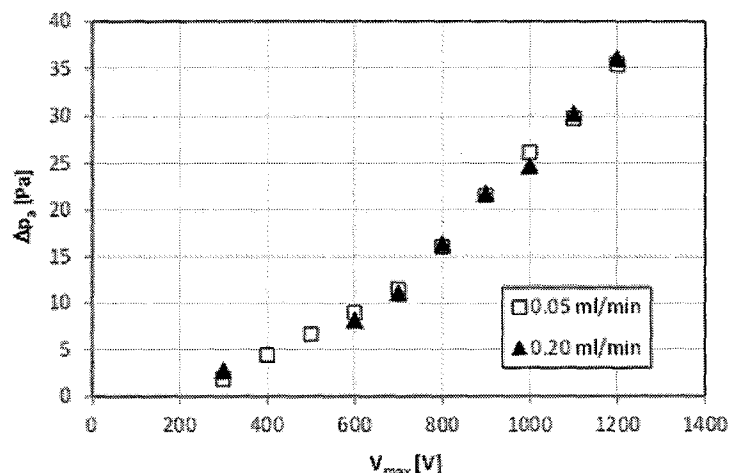
Rys. 11. Mapa przepływu (na górze), obliczony średni stopień zapełnienia ϕ (w środku) i ciśnienie różnicowe Δp mierzone między wlotem i wylotem ogrzewanego mikrokanалу (na dole) dla wydátku pompy 0.05 ml/min i bez napięcia na elektrodach kontrolera LDEP [B8].

Naprzemiennie włączanie i wyłączanie napięcia w kontrolerze LDEP wprowadza okresowe zaburzenia wydátku i ciśnienia na wlocie do ogrzewanego mikrokanálu i w ten sposób wpływa na ewolucję fazy parowej w tym mikrokanale. Powoduje to także okresowe wahania średniego stopnia zapełnienia i ciśnienia różnicowego, szczególnie dobrze widoczne przy dużych wartościach napięcia, rys. 12. Stwierdzono, że zerowy potencjał przyłożony do elektrod kontrolera LDEP powoduje przyspieszenie ruchu pęcherzyków/korków w ogrzewanym mikrokanale, przy jednoczesnym spadku ciśnienia różnicowego. Jest to spowodowane uwolnieniem pewnej objętości cieczy, uprzednio podtrzymywanej siłą LDEP w

kontrolerze, która wpływając do mikrokanłu zwiększa w nim prędkość przepływu i straty ciśnienia. Gdy napięcie zostaje włączone, część cieczy wypływającej z pompy kieruje się do kontrolera, zmniejszając przepływ i ciśnienie różnicowe w ogrzewanym mikrokanale.



Rys. 12. Mapa przepływu (na górze), obliczony średni stopień zapełnienia ϕ (w środku) i ciśnienie różnicowe Δp zmierzone między wlotem i wylotem ogrzewanego mikrokanłu (na dole) dla wydatku pompy 0.05 ml/min i maksymalnym napięciu na elektrodach kontrolera LDEP równym ± 800 V (1600 Vpp), przykładanym w okresach trwających 10 s [B8].



Rys. 13. Amplituda zmian ciśnienia różnicowego Δp_a w funkcji maksymalnej wartości napięcia V_{LDEP} przyłożonej do elektrod kontrolera LDEP, wyznaczona dla dwóch wartości wydátku pompy używanych podczas pomiarów [B8].

Amplituda zmian mierzonego ciśnienia różnicowego, spowodowanych przemiennym przykładaniem napięcia do elektrod kontrolera LDEP, była powtarzalna i dobrze skorelowana z maksymalną amplitudą napięcia, jak to pokazano na rys. 13. Zależność ta jest taka sama dla obu stosowanych wydátków pompy.

Podsumowując wykonane pomiary, które zostały w sposób szczegółowy opisane w artykule M. Lackowski, R. Kwidziński, J. Karwacki i T. Przybylińskiego (M. Lackowski, R. Kwidziński, J. Karwacki, T. Przybyliński, *Experimental observations of flow structures during DEP controlled boiling in a microchannel*, *Archives of Thermodynamics* Vol. **38** (2018), No. 1, 125–141, doi: 10.1515/aoter-2018-0007) można stwierdzić, że w badanym układzie przepływowym kontroler LDEP wpływa na przebieg wrzenia przede wszystkim poprzez zmianę wydátku cieczy na wlocie do ogrzewanego mikrokanálu, co ma miejsce gdy napięcie przykładane do elektrod kontrolera jest włączane lub wyłączane. Powoduje to także zmiany oporów hydraulicznych wrzącego przepływu. Dynamiczne zmiany wydátku przepływu można wykorzystać do sterowania zawartością fazy parowej w mikrokanale. Do uzyskania istotnego zakresu kontroli wymagane jest jednak przyłożenie stosunkowo wysokiego napięcia, rzędu ± 1000 V (2000 Vpp). Należy zaznaczyć, że opisane w omawianym artykule wyniki po raz pierwszy w literaturze pokazały wpływ zjawiska dielektroforezy cieczy zastosowanego w kontrolerze LDEP na przebieg wrzenia w mikrokanale.

Autor autoreferatu prowadził prace badawcze dla układów gdzie również występowały zjawiska oddziaływania pola elektrycznego na przepływ dwufazowy, do niniejszego autoreferatu autor dołączył jedną z prac powiązaną z zagadnieniem a pokazującą w ocenie autora szerszy potencjał stosowania oddziaływań elektrycznych na przepływ dwufazowy w technice. Praca ta autorstwa M. Lackowskiego, T. Przybylińskiego i J. Karwackiego (M. Lackowski, T. Przybyliński, J. Karwacki, *Electrohydrodynamic technique of condensation enhancement*. *Przegląd Elektrotechniczny* R. 92 Nr 8/2016, doi:10.15199/48.2016.08.25) dotyczy intensyfikacji procesu wnikania ciepła podczas kondensacji poprzez poprawę spływu kropli wskutek działania pola elektrycznego. Problem niskich wartości współczynnika wnikania ciepła podczas kondensacji dotyczy wielu czynników roboczych stosowanych w chłodnictwie, klimatyzacji, pompach ciepła, rurekach cieplnych i niekonwencjonalnych obiegach energetyki cieplnej (ORC). Jest to niekorzystne zjawisko, powodujące że wymieniana ciepła jest mało efektywna. Stąd też bierze się motywacja do poszukiwania rozwiązań intensyfikujących wymianę ciepła podczas kondensacji. Dla dielektrycznych czynników roboczych stosowanych powszechnie w wymienionych wyżej dziedzinach można wykorzystać w tym celu metodę elektrohydrodynamiczną (EHD).

W omawianej pracy przedstawiono eksperymentalne badania kondensacji na zewnętrznych powierzchniach pęczka poziomych rur uźebrowanych, wchodzących w skład skraplacza. Pole elektryczne

przykładano pomiędzy każdą z rur a parą elektrod prętowych, umieszczonych w pobliżu zewnętrznej powierzchni rury. Minimalny odstęp między elektrodami a wierzchołkami żeber rur skraplacza wynosił 3 mm. Przyłożenie pola elektrycznego wpływa na ruch filmu cieczy (kondensatu) tworzącego się na powierzchniach rur, poprawiając jego spływ w dolnych partiach rury. Podczas badań wykonano pomiary umożliwiające określenie wartości współczynnika przenikania ciepła k w zależności od wartości napięcia elektrycznego przyłożonego do elektrod. Czynnikiem roboczym w eksperymencie był HFE-7100. Pomiary temperatur na wlocie i wylocie badanego skraplacza wykonano z dokładnością 0.2 K, a pomiary wydatku masowego przepływu z dokładnością 0.15 %. Napięcie elektryczne przykładane do elektrod mieściło się w zakresie od 0 do 12.5 kV.

Dla badanego skraplacza pracującego bez pola elektrycznego uzyskano wartość współczynnika przenikania ciepła równą $k = 353 \text{ W/m}^2\text{K}$. Po przyłożeniu napięcia do elektrod wymiana ciepła, zgodnie z oczekiwaniami, uległa intensyfikacji, a wartości współczynnika k wzrosły. Obserwowane zwiększenie k było proporcjonalne do wartości napięcia. Maksymalną wartość $k = 380 \text{ W/m}^2\text{K}$ uzyskano przy napięciu 12.5 kV. Jest to więc wzrost o 8 % w porównaniu do przypadku bez pola elektrycznego. Dalsza intensyfikacja okazała się niemożliwa ze względu na pojawienie się wyładowania elektrycznego między elektrodami a powierzchnią rur.

Wykonane badania dowiodły, że intensyfikacja wymiany ciepła metodą EHD jest możliwa nie tylko dla pojedynczej rury, ale może być z powodzeniem stosowana do pęczka rur, czyli typowej konfiguracji występującej w skraplaczach. Zaprezentowane w pracy wyniki eksperymentalne dla pęczka rur, z elektrodami prętowymi przy każdej z nich, są unikalne i nie były dotychczas publikowane. Wskazują one, że dla dielektrycznych czynników roboczych stosowanych m.in. w małych siłowniach ORC, metoda EHD oferuje kilkuprocentowy wzrost współczynnika przenikania ciepła.

Autor pragnie również zaznaczyć, że prowadzone prace nad zagadnieniem dielektroforezy cieczowej znalazły uznanie w Polskiej Akademii Nauk i zostały wyróżnione publikacją w Roczniku Polskiej Akademii Nauk (*M. Lackowski, New dielectrophoretic system for microflow control, Annual Report of the Polish Academy of Sciences, 2017, pp. 52-53*). W pracy tej przedstawiono ideę zastosowania dielektroforezy cieczowej do kontroli natężenia przepływu w mikrokanale oraz wyniki badań eksperymentalnych dynamiki podnoszenia cieczy. W corocznym wydaniu Annual Report przedstawiane jest tylko kilka zagadnień badawczych z technicznych instytutów PAN.

Podsumowując, do oryginalnych moich osiągnięć podczas realizacji badań mogę zaliczyć:

- a) Zastosowanie zjawiska dielektroforezy cieczy do kontroli przepływu w układach mikrokanałowych. Autor zaproponował oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne, przeprowadził badania których wyniki potwierdziły skuteczność przyjętego rozwiązania. Prace autora są pierwszymi dotyczącymi takiego zastosowania zjawiska dielektroforezy cieczy w literaturze.
- b) Przeprowadzenie całościowej, ogólnej analizy dynamiki podnoszenia się płynu pod wpływem siły LDEP w mikrokanale. Przeprowadzono teoretyczną, numeryczną i eksperymentalną analizą wpływu siły LDEP na czasową zależność wysokości podciągania cieczy w układzie kapilarnym utworzonym przez dwie płasko równoległe elektrody umieszczone pionowo i zanurzone w zbiorniku o dużej objętości.
- c) Zastosowanie zjawiska dielektroforezy cieczy do kontroli procesu wrzenia w mikrokanale, autor przeprowadził zarówno prace o charakterze modelowym (numerycznym) jak i eksperymentalnym pokazując one możliwość wykorzystania dielektroforezy cieczy do wpływania na proces wrzenia w mikrokanale. Autor zaproponował oryginalny model uwzględniający zarówno proces podnoszenia cieczy dielektrycznej w zaproponowanym oryginalnym kontrolerze jak i proces wrzenia w mikrokanale.

Plany na przyszłość

Oddziaływanie pola elektrycznego na przepływ dwufazowy cieczy dielektrycznej jest zagadnieniem mającym znaczny potencjał poznawczy. Prowadzone obecnie i w przeszłości prace badawcze koncentrują się w dużej mierze na wpływie zjawiska dielektroforezy na komórki biologiczne lub wykorzystaniu dielektroforezy cieczy w zagadnieniach dozowania nanolitrych objętości cieczy w szerokokorozumianych technologiach medycznych („lab-on-chip”). Badania zjawiska dielektroforezy cieczy w aspekcie kontroli natężenia przepływu w mikrokanalach czy też kontroli procesu wrzenia zostały zapoczątkowane w pracach autora. W ocenie autora istnieje ogromny obszar badań koniecznych do przeprowadzenia dla lepszego poznania omawianego zjawiska, szczególnie w aspekcie zastosowania innych substancji (czynników) dielektrycznych. W obszar ten wchodzi zarówno badania eksperymentalne, w tym badania wpływu oddziaływania pola elektrycznego na stabilność wykorzystywanych substancji (czynników) chemicznych. Szczególnie jeśli uwzględnimy fakt, że większość substancji niskowrzących wykorzystywanych zarówno w systemach energetycznych opartych na obiegach ORC, pompach ciepła czy też instalacji chłodniczych jest dielektrykami, pojawia się ogromny obszar potencjalnych zastosowań.

Kolejnym potencjalnym obszarem badawczym jest dobór parametrów elektrycznych opracowanego kontrolera, takich aby uzyskać oczekiwany efekt regulacji natężenia przepływu. Ważnym etapem przyszłych prac badawczych jest również w ocenie autora zastosowanie opracowywanego systemu dla kontroli natężenia przepływu w systemach wielomikrokanalowych wymienników ciepła. Jest to etap konieczny dla planowanej w przyszłości komercjalizacji rozwiązania.

W opinii autora ze względu na stosunkowo niewielką ilość publikacji z przedmiotowego obszaru badań, nowość tematyki, w miarę postępu prac badawczych powinny pojawić się nowe zagadnienia badawcze.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

1. W ramach prowadzonych prac badawczych autor wraz z współpracownikami opracował innowacyjny i oryginalny elektrostatyczny system do usuwania kropli mgły olejowej z przewodów tłocznych sprężarek chłodniczych. Brał udział w pracach badawczych nad nim. Wyniki prowadzonych badań pokazały, że zaproponowane rozwiązanie skutecznie usuwa krople oleju z par czynników chłodniczych oraz że wykorzystywane wyładowanie (do procesu elektryzacji kropli) nie wpływa na skład chemiczny i parametry czynników chłodniczych. Do badań zachowania składu chemicznego substancji autor wykorzystywał metody spektroskopowe [L15, L16, L11].
2. Autor prowadził wraz z współpracownikami badania nad wykorzystaniem elektroprzędzenia do generacji nanowłókninowych mat filtracyjnych. Następnie uczestniczył w pracach badawczych nad wykorzystaniem otrzymanych mat filtracyjnych w procesie filtracji gazów. Otrzymane wyniki pokazały skuteczność wykorzystania elektroprzędzenia w procesie generacji mat nanowłókninowych, zapewniło ono utrzymanie stałej i stosunkowo niewielkiej średnicy nanowłókien. Odpowiednia konstrukcja stanowiska badawczego do wytwarzania mat pozwoliła z kolei na uzyskanie kontrolowanej gęstości ułożenia. Eksperymentalnie otrzymano zależności parametrów elektroprzędzenia (napięcia, odległości, natężenia przepływu) w funkcji średnic i ułożenia nanowłókien. Ważnym aspektem prowadzonych prac było również nanoszenie nanocząstek tlenków metali na włókniyny filtracyjne. Autor brał udział w badaniach w których wykorzystywano rozpylanie EHD do procesu nanoszenia nanocząstek tlenków metali zarówno podczas generacji nanowłókien (procesy równoczesne) jak i po ich uprzednim wygenerowaniu. Z kolei badania wykorzystania otrzymanych filtracyjnych mat nanowłókninowych do procesów filtracji szczególnie w aspekcie usuwania cząstek okółomikronowych (symulowanych np. przez dym papierosowy) pokazały stosunkowo wysoką skuteczność filtracji przy jednoczesnym niewielkim spadku ciśnienia na warstwie filtracyjnej. W badaniach wykorzystano skaningową mikroskopię elektronową [A2, A4, A6, A8, A9].

3. Autor prowadził wraz z współpracownikami badania nad procesem rozpylania EHD cieczy oraz wykorzystania badanego procesu m.in. w zagadnieniach usuwania zanieczyszczeń stałych lub smół. W badaniach koncentrowano się na zagadnieniach wpływu parametrów rozpylania (natężenie przepływu, natężenie pola elektrycznego) na przestrzenny rozkład wielkości kropeł, uwzględniano również wzajemne oddziaływanie rozpylanych strug dla układów wielodyszowych. Należy tutaj zaznaczyć, że rozpylone krople obdarzone są ładunkiem elektrycznym, który wpływa na przestrzenny rozkład pola elektrycznego. W ramach prac badawczych autor wraz z współpracownikami prowadził badania zastosowania procesu skrubowania opartego na rozpylaniu EHD w usuwaniu zanieczyszczeń w szczególności submikronowych (symulowanych przez dym papierosowy lub przez podawane cząstki stałe). W ramach prowadzonych prac badano zarówno przypadki gdy tylko krople cieczy skrubującej są obdarzone ładunkiem elektrycznym, jak i przypadki gdy zarówno cząstki usuwanych zanieczyszczeń jak i krople obdarzone są ładunkiem. Otrzymane wyniki pokazały, że zastosowanie jednocześnie naelektryzowanych różnoimiennymi ładunkami cząstek i kropli powoduje wzrost skuteczności odpylania w obszarze cząstek submikronowych [A11, A12, A14, A18].
4. Autor wraz z współpracownikami prowadził również badania w zakresie wyładowania wstecznego („back discharge”) występującego w procesach elektrofiltracji w przypadku gdy na elektrodzie zbiorczej dochodzi do zbyt dużego nagromadzenia się warstwy odpylonych cząstek dielektrycznych (stosunkowy duży opór warstwy). W ramach prac badawczych prowadzono prace obejmujące badania morfologii samego wyładowania, wpływu na strukturę zgromadzonego na elektrodzie zbiorczej pyłu. W badaniach wykorzystywano metody spektroskopowe [A7, A13, A15, A17].
5. Autor kontynuował wraz z współpracownikami, po doktoracie, prace nad mechanizmami elektryzacji cząstek w przemiennym polu elektrycznym. Prowadzone prace były nakierowane na wykorzystanie mechanizmu elektryzacji w przemiennym polu elektrycznym w systemach dwusekcyjnych w których oddzielona jest sekcja elektryzacji od sekcji usuwania zanieczyszczeń z przepływu. Badania prowadzono mając na celu zwiększenie skuteczności pracy systemów odpylających w aspekcie cząstek submikronowych [A5, A16, A19, A21, A22].



Marcin Lackowski