

Magdalena SOBCZAK¹
Zbigniew ZAPAŁOWICZ²

Wpływ odsysania mieszaniny parowo-powietrznej na efektywność procesu chłodzenia strumieniem kropeł

W pracy przedstawiono budowę stanowiska badawczego, metodykę pomiarów i obliczeń oraz wstępne wyniki badań doświadczalnych procesu chłodzenia podgrzewanej powierzchni strumieniem kropeł wody, gdy powstająca mieszanina parowo-powietrzna jest odsysana z zamkniętej przestrzeni otaczającej grzejnik. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów procesu chłodzenia grzejnika tj. przy zastosowaniu bocznego odsysania powstającej mieszaniny przestrzeni nad ogrzewaną powierzchnią, przy odsysaniu tej mieszaniny z wnętrza tej przestrzeni oraz w warunkach, gdy mieszanina parowo-powietrzna nie jest odsysana. Celem pracy jest analiza wpływu miejsca odsysania mieszaniny parowo-powietrznej oraz czasu na intensywność procesu odparowania filmu wodnego. Eksperyment przeprowadzono dla temperatury podgrzewanej powierzchni wynoszącej 90°C. Na podstawie analizy wstępnych wyników badań doświadczalnych oszacowano, że odsysanie mieszaniny parowo-powietrznej z wnętrza przestrzeni zwiększa intensywność odparowania chłodziwa (wody) o około 5÷30%, gdy czas chłodzenia wzrasta trzykrotnie. Zmiana miejsca odsysania mieszaniny parowo-powietrznej nie zmienia istotnie intensywności odparowania filmu wodnego.

Słowa kluczowe: odsysanie, odparowanie, film wodny, odprowadzanie pary, chłodzenie strugą, chłodzenie ścianki

1. Wprowadzenie

Procesy chłodzenia nagranych powierzchni ścianek mają istotny wpływ na sprawność i eksploatację wielu urządzeń technicznych. Zwiększenie intensywności odbioru ciepła od nagranych powierzchni jest jednym z ważniejszych kierunków rozwoju współczesnej energetyki. O efektywności procesu chłodzenia decyduje między innymi rodzaj chłodziwa. Obecnie, ze względu na dostępność i koszt najczęściej stosowanymi chłodziwami są powietrze i woda.

Konwekcyjne chłodzenie za pomocą strumienia powietrza jest jednak mało intensywne, a ilość odprowadzanego od nagrzanej powierzchni ciepła jest stosunkowo mała. Ponadto, układ konwekcyjnego chłodzenia powietrznego ma

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Magdalena Sobczak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin, Tel. 91 449 4272, e-mail: magdalena.sobczak@zut.edu.pl

² Zbigniew Zapałowicz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, e-mail: zbigniew.zapalowicz@zut.edu.pl

duże wymiary co przy miniaturyzacji urządzeń ogranicza jego stosowanie. O wiele lepszą intensywność chłodzenia zapewnia konwekcyjne chłodzenie wodą. W związku z tym systemy chłodzenia wodą wykorzystuje się ostatnio np. do chłodzenia elementów elektroniki [2, 4, 5, 17]. Do chłodzenia nagrzaných powierzchni można także wykorzystać chłodziwa o różnych właściwościach chemicznych i fizycznych m.in: alkohole [7-10], ciekłe metale [1], parafiny, które zmieniają fazę w wyniku ogrzania [16] oraz nanopłyny [3].

W praktyce coraz częściej do odprowadzania ciepła z nagrzaných powierzchni wykorzystuje się procesy chłodzenia ze zmianą fazy cieczy chłodzącej. Ciecz podawana jest za pomocą pojedynczej dyszy lub zespołu dysz chłodzących w postaci strugi lub strug o strukturze ciągłej lub kropłowej [7-9, 15, 19]. Doprowadzona do nagrzanęj powierzchni ciecz może tworzyć film cieczowy lub strukturę kropłową [6-7, 11, 19-20]. W przypadku użycia wody jako chłodziwa może być ona doprowadzana do podgrzanęj powierzchni w postaci strug [7, 11] bądź „spray’ów”, tj. mieszanin wody z powietrzem [2-4, 10, 13-14, 20]. Odparowanie wody intensyfikuje proces odbioru ciepła od nagrzanęj powierzchni.

Dalsza intensyfikacja procesu chłodzenia jest możliwa, gdy powstająca para wodna jest odprowadzona z przestrzeni nad filmem wodnym, pokrywającym nagrzaną powierzchnię ścianki. W literaturze przedmiotu niewiele jest informacji o tym sposobie chłodzenia ścianek. W pracy [12] Autorzy przedstawili wstępne wyniki badań doświadczalnych chłodzenia podgrzanęj ścianki za pomocą strugi wody, gdy powstająca para wodna wraz z powietrzem jest odsysana z przestrzeni nad filmem wodnym. Od strony powietrza przestrzeń nad grzejnikiem nie ma ograniczeń.

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu czasu podawania cieczy i miejsca odsysania mieszaniny parowo-powietrznej z zamkniętej przestrzeni nad podgrzewaną powierzchnią na intensyfikację wymiany ciepła między nią, a chłodziwem.

2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z czterech następujących układów (rys. 1): zakraplania, grzania, odsysania oraz pomiaru i rejestracji temperatury. Zakraplacz i grzejnik umieszczono wewnątrz szklanej kolby z odciętym dnem. Szklane dno kolby zastąpiono bakelitową płytką. W bocznej ściance kolby znajduje się króciec do odprowadzania mieszaniny parowo-powietrznej. Struga cieczy jest wytwarzana w zakraplaczu, którym jest sztywny wężyk plastikowy o średnicy zewnętrznej równej 0,0048 m. Wężyk wsunięto w metalową rurkę, którą następnie zamontowano w gumowym korku i umieszczono w szklanej kolbie. Zakraplacz jest połączony gumowymi przewodami ze zbiorniczkiem przelewowym. Zbiorniczek umieszczono na statywie. Zadaniem zbiorniczka przelewowego jest zapewnienie stałego ciśnienia hydrostatycznego napływającej cieczy,

a więc stałego jej natężenia przepływu. W niniejszej pracy cieczą chłodzącą była woda.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego

Fig. 1. View of test stand

Wytworzona w zakraplaczu struga wody jest kierowana na powierzchnię roboczą grzejnika zamontowanego w płycie bakelitowej. Odległość zakraplacza od chłodzonej powierzchni można regulować. Nadmiar wody chłodzącej z powierzchni grzejnej spływa poprzez kanał odprowadzający do zbiornika pomiarowego, będącego ostatnim elementem układu zakraplania. Odsysanie mieszaniny parowo-powietrznej z przestrzeni nad powierzchnią roboczą grzejnika odbywa się za pomocą pompy próżniowej typu 1154.4, podłączonej gumowym przewodem do króćca znajdującego się na bocznej powierzchni przezroczystej kolby lub z wnętrza kolby poprzez wężyk plastikowy umieszczony w połowie odległości króćca od tej powierzchni.

Grzejnik w formie bloczku miedzianego o wymiarach $0,04 \times 0,04 \times 0,02$ m jest umieszczony w płycie pod zakraplaczem. Wewnątrz płytki miedzianej zamontowano standardową grzałkę elektryczną w kształcie cylindra o średnicy $0,006$ m i długości $0,04$ m. Moc elementu grzejnego wynosi 110 W. Regulacja temperatury grzania następuje za pomocą regulatora typu RK40. Sygnałem sterującym jest temperatura zmierzona wewnątrz grzejnika termometrem oporowym Pt100. W grzejniku wywiercono otwory, w których zamontowano czujniki temperatury. Do pomiaru rozkładu temperatury w grzejniku zastosowano termopary typu J o średnicy $0,001$ m. Termopary te podłączono do układu akwizycji danych wyposażonego w rejestrator APAR typu AR206/8.

3. Metodyka badań

W celu określenia wpływu odsysania mieszaniny parowo-powietrznej na efektywność wymiany ciepła między chłodziwem, a grzaną powierzchnią badano intensywność odparowania filmu wodnego wykorzystując metodę objętościową. W niniejszych badaniach jako chłodziwo zastosowano wodę destylowaną o temperaturze 21°C. Przed pomiarem przygotowano trzy naczynka z wodą, każde o pojemności 30 ml. Zakraplacz umieszczono w odległości 0,001 m od powierzchni grzejnej. Wypływ wody z zakraplacza jest wywołany ciśnieniem hydrostatycznym. W niniejszych badaniach wysokość słupa wody, mierzona między powierzchnią lustra w zbiorniczku przelewowym, a końcówką zakraplacza, była równa 0,536 m. Następnie ustalano natężenie wypływu wody z zakraplacza. Zmiana natężenia przepływu wody powodowała skrócenie lub wydłużenie czasu pomiaru. Do regulacji strumienia wody używano zacisku zamontowanego na węźle łączącym zbiorniczek z zakraplaczem. Układ odsysający znajdował się na wysokości około 0,18 m lub 0,09 m od powierzchni grzejnej. Eksperyment przeprowadzono dla temperatury powierzchni grzanej równej 90°C. Po osiągnięciu przez układ stanu ustalonego uruchamiano zakraplacz i strumień kropeł kierowano na powierzchnię grzejną. Przy pomocy stopera mierzono czas potrzebny do przepływu 30 ml wody przez zakraplacz. Po każdym pomiarze zlewano nieodparowaną wodę ze zbiornika pomiarowego i następnie obliczano objętość odparowanej wody.

Badania przeprowadzono w 3 próbach: bez odsysania mieszaniny parowo-powietrznej, z jej odsysaniem poprzez króciec znajdujący się na bocznej powierzchni szklanej kolby oraz poprzez wężyk plastikowy umieszczony we wnętrzu kolby. W tym ostatnim przypadku plastikowy wężyk miał średnicę zewnętrzną równą 0,005 m. W każdej próbie wykonano po trzy serie pomiarowe.

W celu określenia intensywności odparowania filmu wodnego zdefiniowano bezwzględne i względne współczynniki odparowania. Intensywność odparowania wody można oceniać w stosunku do ilości wody, która została doprowadzona do powierzchni grzejnej. W tym przypadku bezwzględny współczynnik odparowania jest zdefiniowany jako różnica masy wody doprowadzonej do grzejnika i masy wody, która nie odparowała:

$$m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

W badanym zakresie zmian temperatury wody jej gęstość zmienia się nieznacznie, tak więc odpowiednie masy wody mogą być zastąpione ich objętościami, a więc:

$$m = (V_1 - V_2) \cdot \rho \quad (2)$$

gdzie: V_1 , V_2 - objętości wody przed i po pomiarze, przy czym $V_1 = 30$ ml.

Względny współczynnik odparowania można wtedy zdefiniować jako stosunek masy odparowującej wody do początkowej masy wody doprowadzonej do powierzchni grzejnej. Wartość tego współczynnika można obliczyć w procentach, korzystając ze wzoru:

$$\xi = \frac{m}{m_1} \cdot 100\% = \frac{V}{V_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

Wpływ procesu odsysania mieszaniny parowo-powietrznej na intensywność procesu odparowania wody można także ocenić w stosunku do procesu odparowania ale bez odsysania. Bezwzględny współczynnik odparowania jest wtedy obliczany jako różnica mas odparowującej wody w wariancie z (apostrof s) i bez zastosowania odsysania mieszaniny parowo-powietrznej (apostrof b):

$$m_o = m_o^s - m_o^b = (V_o^s - V_o^b) \cdot \rho \quad (4)$$

W tym przypadku względny współczynnik odparowania jest definiowany jako stosunek bezwzględnego współczynnika odparowania wody m_o do masy strumienia odparowanej wody przy braku odsysania mieszaniny parowo-powietrznej m_o^b . Parametr ten może być także obliczany w procentach, zgodnie z zależnością:

$$\kappa = \frac{\Delta m_o}{m_o^b} \cdot 100\% = \frac{m_o^s - m_o^b}{m_o^b} \cdot 100\% = \frac{(V_o^s - V_o^b)}{V_o^b} \cdot 100\% \quad (5)$$

4. Wyniki badań

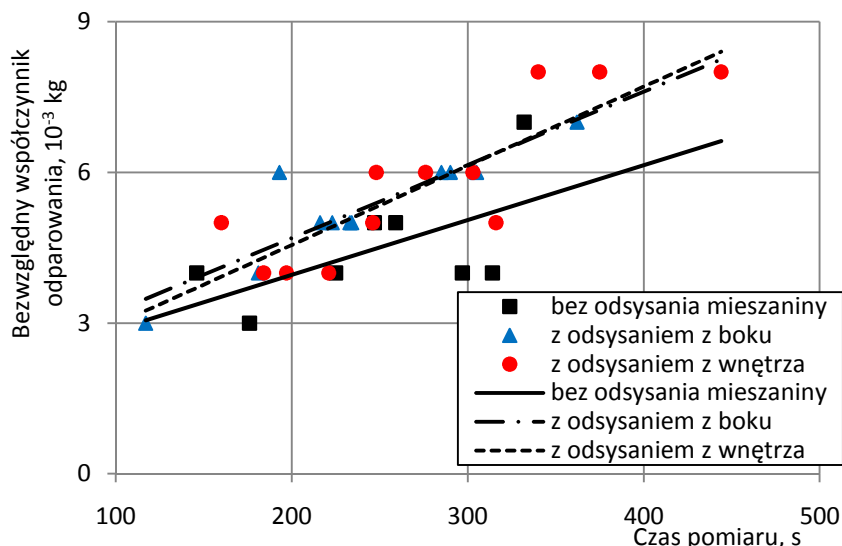
Wyniki badań doświadczalnych, po wykonaniu analizy statystycznej i odrzuceniu punktów pomiarowych uznanych za błędy grube, przedstawiono w formie wykresów. Zdecydowano się na zastosowanie kryterium oceny, zgodnie z którym punkt pomiarowy jest wykluczany z analizy, jeśli jego wartość różni się więcej niż o wartość jednokrotnego odchylenia standardowego. Na rysunku 2 przedstawiono bezwzględny współczynnik odparowania dla wody m , obliczony z zależności (2), w funkcji czasu pomiaru odpowiednio przy odsysaniu i braku odsysania mieszaniny parowo-powietrznej. Na rysunku tym wykreślono również linie tendencji pokazujące liniowy kierunek zmian tego parametru. Z ich przebiegu wynika, co jest zgodne z oczekiwaniami, że masa odparowującej wody jest większa, gdy czas pomiaru ulega wydłużeniu. Linie tendencji ilustrujące intensywność odparowania wody w przypadku zastosowania odsysania charakteryzują się większym nachyleniem niż ta, gdy brak jest odsysania mieszaniny parowo-powietrznej. Równania aproksymujące wyniki pomiarów mają postać:

$$m_o^b = (1,7716 + 1,0878 \cdot 10^{-2} \cdot \tau) \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

$$m_o^{sI} = (1,7698 + 1,4571 \cdot 10^{-2} \cdot \tau) \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

$$m_o^{sII} = (1,3967 + 1,5768 \cdot 10^{-2} \cdot \tau) \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

przy czym apostrofy *sI* i *sII* oznaczają odpowiednio miejsce odsysania mieszaniny parowo-powietrznej tj. z boku i z wnętrza kolby.



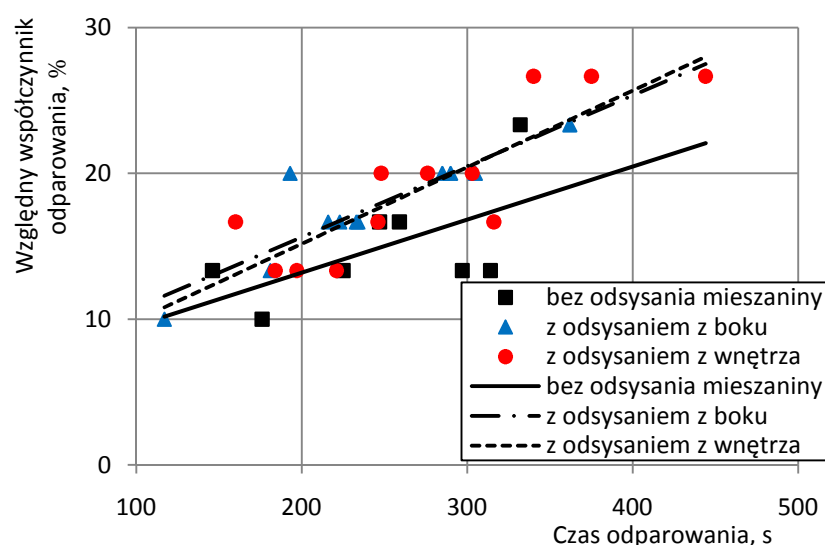
Rys. 2. Bezwzględny współczynnik odparowania m dla wody w funkcji czasu pomiaru

Fig. 2. Relation between mass of evaporated water and time

Z kolei na rysunku 3 przedstawiono zależność między względnym współczynnikiem odparowania ξ , obliczonym ze wzoru (3), a czasem pomiaru. Na rysunku tym pokazano także linie tendencji wskazujące, że wzrost czasu pomiaru powoduje większą intensywność odparowania w przypadku zastosowania odsysania mieszaniny parowo-powietrznej. Obliczenie bezwzględnego i względnego współczynnika odparowania bezpośrednio ze wzorów (4) i (5) jest niemożliwe, ponieważ czasy pomiarów odparowania wody są różne. W związku z tym do obliczeń wykorzystano równania aproksymacyjne podane wzorami (6) ÷ (8). Do wzorów tych podstawiono wartości czasu odpowiadające końcom zakresu pomiarowego tj. $\tau = 100s$ i $\tau = 450s$, co pozwoliło obliczyć odpowiednie wartości mas odparowującej wody m_o^b , m_o^{sI} , m_o^{sII} . Następnie ze wzorów (4) i (5) można wyznaczyć odpowiednie wartości bezwzględnego i względnego współczynnika odparowania wynikające z porównania procesów odparowania

wody z odsysaniem i brakiem odsysania powstającej mieszaniny parowo-powietrznej.

Wpływ czasu na intensywność odparowania warstwy wody z powierzchni grzejnika można wyjaśnić w sposób podany poniżej. W chwili rozpoczęcia procesu chłodzenia wymiana ciepła między strumieniem kropeł a powierzchnią grzejną ma charakter nieustalony. Krople cieczy po osiągnięciu powierzchni grzejnika zaczynają tworzyć film wodny, który stopniowo zaczyna pokrywać całą jego powierzchnię. Następnie nadmiar wody spływa z powierzchni grzejnika i jest gromadzony w naczyniu zbiorczym. Jeśli natężenie wypływu wody z zakraplacza jest duże to wzrasta także natężenie przepływu wody na powierzchni grzejnika. To z kolei powoduje, że czas przebywania objętości kontrolnej wody na powierzchni grzejnika jest krótszy. W związku z tym mniej wody ulega przemianie fazowej tworząc parę, a więcej spływa do naczynia zbiorczego. Zmniejszenie natężenia wypływu wody z zakraplacza skutkuje dłuższym przebywaniem objętości kontrolnej wody na powierzchni grzejnika i sprzyja większemu jej odparowaniu.



Rys. 3. Względny współczynnik odparowania dla wody w funkcji czasu

Fig. 3. Relative coefficient of evaporation for water in function of time

Z analizy wyników badań wynika, że intensywność chłodzenia powierzchni (odprowadzania ciepła) można zwiększyć jeśli zastosuje się odsysanie mieszaniny parowo-powietrznej. Przybliżone średnie wartości względnego współczynnika odparowania wynoszą około 5÷30% w przypadku gdy mieszanina jest odsysana z wnętrza przestrzeni utworzonej nad grzejnikiem. Otrzymane wyniki badań wykazują jednak duży rozrzut punktów pomiarowych, wynikający z jeszcze niedoskonałej metodyki badań. Przyczyną tak dużego rozrzutu punktów pomia-

rowych może być między innymi zastosowanie metody objętościowej oceny ilości odparowującej wody oraz trudność w równomiernym wytwarzaniu strumienia kropeł wody w zakraplaczu. Na podstawie otrzymanych wyników badań nie można jednoznacznie stwierdzić, że wybór miejsca odsysania mieszaniny parowo-powietrznej ma istotny wpływ na proces odparowania wody. Z analizy danych wynika jedynie, że zastosowanie odsysania mieszaniny parowo-powietrznej poprzez boczny króciec w kolbie daje lepsze efekty niż odsysanie z wnętrza układu przy krótszych czasach pomiaru.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można stwierdzić, że odsysanie mieszaniny parowo-powietrznej z przestrzeni nad podgrzewaną powierzchnią pokrytą filmem wodnym zwiększa intensywność jego odparowania o około 5÷30%. O intensywności odparowania filmu wodnego decyduje czas przebywania wody na powierzchni grzejnej, który zależy od natężenia jej wypływu z zakraplacza oraz od miejsca, z którego jest odsysana mieszanina parowo-powietrzna. Prowadzone badania doświadczalne wykazały, że trzy i półkrotny wzrost czasu powoduje około trzykrotny wzrost względnego współczynnika odparowania filmu wodnego. Odsysanie mieszaniny parowo-powietrznej z wnętrza przestrzeni układu lepiej intensyfikuje odparowanie filmu wodnego w porównaniu z odsysaniem poprzez króciec w ścianie bocznej kolby dopiero przy dłuższych czasach odparowania. Wstępne wyniki badań wskazują na konieczność modyfikacji zarówno stanowiska badawczego jak i metodyki badań.

Literatura

- [1] Deng Y., Liu J.: A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 37 (2010) 788-791.
- [2] Hsieh S-S., Luon S-Y.: Droplet impact dynamics and transient heat transfer of a micro spray system for power electronics, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 92 (2015) 190-205.
- [3] Jha J.M., Ravikumar S.V., Tiara A.M., Sarkar I., Pal S.K.: Ultrafast cooling of a hot moving steel plate by using alumina nanofluid based air atomized spray impingement, *Applied Thermal Eng.*, 75 (2015) 738-747.
- [4] Kim J.: Spray cooling heat transfer: The state of the art, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28 (2007) 753-767.
- [5] Lai Y., Cordero N., Barthel F., Tebbe F., Kuhn J., Apfelbeck R.: Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications, *Applied Thermal Eng.*, 29 (2009) 1239-1244.
- [6] Lin C., Chen C.J., Chieng C.C., Tseng F.G.: Dynamic effects of droplet impingement on nanotextured surface for high efficient spray cooling, *Int. Conf. Transducers' 11, Beijing 2011*.

- [7] Lin S-M., Liu H-F., Wang W-R., Lee S.Y., Cheng C-Y., Li C-Y.: Optimum design and heat transfer correlation equation of a mini radiator with jet impingement cooling, *Applied Thermal Eng.*, 89 (2015) 727-737.
- [8] Panão M.R.O., Correia A.M., Moreira A.L.N.: High-power electronics thermal management with intermittent multijet sprays, *Applied Thermal Eng.*, 37 (2012) 293-301.
- [9] Panão M.R.O., Moreira A.L.N., Durao D.F.G.: Thermal-fluid assessment of multijet atomization for spray cooling applications, *Energy*, 36 (2011) 2302-2311.
- [10] Ravikumar S.V., Jha J.M., Sarkar I., Pal S. K., Chakraborty S.: Enhancement of heat transfer rate in air-atomized spray cooling of a hot steel plate by using an aqueous solution of non-ionic surfactant ethanol, *Applied Thermal Eng.*, 64 (2014) 64-75.
- [11] Şeşen M., Demir E., İzci T., Khudhayer W., Karabacak T., Koşar A.: Submerged jet impingement cooling using nanostructured plates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 59 (2013) 414-422.
- [12] Sobczak M., Zapałowicz Z.: Badania wstępne wpływu odsysania mieszaniny parowo-powietrznej na efektywność wymiany ciepła między grzaną powierzchnią a chłodzikiem, *ZN PRz Mechanika*, 31 (2014) 249-256.
- [13] Somasundaram S., Tay A.A.O.: A study of the effect of exit boundary conditions on the performance of a spray cooling system, 12th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore 2010.
- [14] Somasundaram S., Tay A.A.O.: Comparative study of intermittent spray cooling in single and two phase regimes, *Int. J. Thermal Sci.*, 74 (2013) 174-182.
- [15] Tan Y.B., Xie J.L., Duan F., Wong T.N., Toh K.C., Choo K.F., Chan P.K., Chua Y.S.: Multi-nozzle spray cooling for high heat flux applications in a closed loop system, *Applied Thermal Eng.*, 54 (2013) 372-379.
- [16] Tinger J., Sedeh M.M., Sharpe T., Bufford A., Floyd T.-Smith: Analysis of a platform for thermal management studies of microelectronics cooling methods, *Applied Thermal Eng.*, 60 (2013) 88-95.
- [17] Vondran G., Makris K., Fragopoulos D., Papadas C., Kumari N.: Thermal performance of inkjet-assisted spray cooling in a closed system, 13th IEEE ITherm Conf., San Diego 2012.
- [18] Wang J-X., Li Y-Z., Zhang S-N., Mao Y-F., Zhang Y-N., Liang Y-H.: Investigation of a spray cooling system with two nozzles for space application, *Applied Thermal Eng.*, 64 (2014) 64-75.
- [19] Xie J.L., Tan Y.B., Duan F., Ranjith K., Wong T.N., Toh K.C., Choo K.F., Chan P.K.: Study of heat transfer enhancement for structured surfaces in spray cooling, *Applied Thermal Eng.*, 59 (2013) 464-472.
- [20] Zhang Z., Li J., Jiang P-X.: Experimental investigation of spray cooling on flat and enhanced surfaces, *Applied Thermal Eng.*, 51 (2013) 102-111.

EFFECT OF STEAM-AIR MIXTURE SUCTION ON EFFECTIVENESS OF IT'S COOLING PROCESS BY STREAM OF WATER DROPLETS

S u m m a r y

The paper presents test stand, research methodology and preliminary results of an experimental cooling of hot surface by stream of water droplets when the resulting steam-air mixture is sucked - off from the confined space surrounding the heater. Experiments were carried out for three cases of cooling process. In the first case steam-air mixture was sucked off from the confined space over heated surface through the outlet at the lateral surface of glass cover, in the second case mixture was sucked off from the center of the confined space over the hot surface and in the third case mixture in question was not sucked off. The vacuum pump was used for suction of steam-air mixture. The paper is aimed at analysis of effect location of steam-air suction point and time on intensity of water film evaporation. The temperature of the heating plate surface during experiments of 90°C. Based on preliminary analysis of the experimental results it was estimated that suction of vapor – air mixture from the interior of the confined space increases the intensity of cooling fluid (water) evaporation of approximately 5-30%, when the cooling time is increased threefold. Change in location of vapor-air suction mixture point enables to increase the intensity of water film evaporation is too high.

Keywords: suction, evaporation, water film, steam evacuation, spray cooling, surface cooling

DOI: 10.7862/rm.2016.5

Otrzymano/received: 24.11.2015 r.

Zaakceptowano/accepted: 15.03.2016 r.