

# Wpływ rodzaju cieczy chłodzącej oraz parametrów przepływu na skuteczność chłodzenia form wtryskowych

Przemysław Poszwa<sup>1), \*)</sup>, Paweł Muszyński<sup>2)</sup>, Krzysztof Mrozek<sup>2)</sup>, Marek Szostak<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.3.7](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.3.7)

**Streszczenie:** Analizowano dostępne na rynku ciecze stosowane do chłodzenia form wtryskowych. Oceniono właściwości termiczne oraz przepływowe badanych cieczy. Określono również wpływ temperatury cieczy oraz prędkości jej przepływu na efektywność transportu ciepła, a także spadek ciśnienia w kanale chłodzącym, badając w ten sposób wydajność chłodzenia formy wtryskowej.

**Słowa kluczowe:** wtryskiwanie, formy wtryskowe, ciecz chłodząca, chłodzenie.

## Influence of coolant type and flow parameters on efficiency of injection mold cooling

**Abstract:** The analysis of commercially available coolants used for injection mold cooling was performed. The thermal and fluid properties of the coolants were evaluated. The influence of coolant temperature and its flow rate on the efficiency of heat transfer and pressure losses in the cooling channel were investigated, with the aim to evaluate the mold cooling efficiency.

**Keywords:** injection molding, injection molds, coolant, cooling.

Wtryskiwanie stanowi jedną z najpowszechniej wykorzystywanych technologii przetwórstwa tworzyw polimerowych. W toku procesu uplastycznione tworzywo jest cyklicznie wtryskiwane do formy, dociskane, zestalane, a następnie z niej usuwane. Ze względu na dużą powtarzalność właściwości oraz wysoką jakość otrzymywanych wyprasek o złożonych kształtach, wtryskiwanie jest stosowane w produkcji części maszyn, opakowań, elementów AGD, części samochodowych i medycznych. Proces wtryskiwania jest energooszczędny, mimo to jednak poszukuje się sposobów na redukcję kosztów wytwarzania, m.in. w wyniku skrócenia czasu cyklu przetwórczego.

W cyklu wtryskiwania najdłużej trwa faza chłodzenia wypraski [1, 2]. W fazie tej następuje schłodzenie płynnego tworzywa wtrzyśniętego uprzednio do formy do temperatury pozwalającej na usunięcie wypraski z gniazda formującego. Długi czas chłodzenia wynika przede wszystkim z niewielkiej przewodności cieplnej tworzyw polimerowych, często traktowanych jako izolatory cieplne. Na szybkość odbioru ciepła z formy wpływ ma również geometria wypraski i jej grubość, rodzaj materiału zastosowanego do wykonania gniazd formujących oraz

sposób rozmieszczenia wokół nich kanałów chłodzących.

Układ chłodzący przede wszystkim ma zapewnić skuteczny, równomierny odbiór ciepła w sposób minimalizujący zjawisko anizotropii skurczowej, przyczyniające się do deformacji i naprężeń własnych wyprasek [3]. Zakłada się, że optymalna prędkość przepływu cieczy chłodzącej, pozwalająca na wydajne chłodzenie, powinna być na tyle duża, aby liczba Reynoldsa określona dla danego przepływu była równa 10 000. Dalsze zwiększanie prędkości przepływu chłodziwa powoduje wyraźny wzrost spadków ciśnienia, nie wpływa przy tym w istotnym stopniu na skuteczność chłodzenia [4]. W literaturze spotyka się również stwierdzenie, że jest to minimalna lub optymalna liczba Reynoldsa, lecz nie definiuje się jej jako wartości maksymalnej, której nie należy przekraczać [5–7]. Można się spotkać również ze stwierdzeniem, że „ekonomiczny” zakres liczby Reynoldsa mieści się między 10 000 a 20 000 [8].

## CIECZE CHŁODZĄCE

Rodzaj stosowanej cieczy chłodzącej odgrywa kluczową rolę w transporcie ciepła z części formujących formy wtryskowej, tym samym ma duży wpływ na czas trwania fazy chłodzenia wypraski. Wydajność odbioru ciepła zależy nie tylko od właściwości termicznych chłodziw, ale również od ich właściwości związanych z przepływem. Wynika to ze zjawiska turbulencji przepływu obserwowanego dla większych prędkości przepływu

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

<sup>2)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

\*) Autor do korespondencji:

e-mail: [przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl](mailto:przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl)

cieczy. Zjawisko to umożliwia efektywny odbiór ciepła generowanego cyklicznie w gniazdach formujących formy wtryskowej.

Woda jest najczęściej wykorzystywanym medium chłodzącym w procesie wtryskiwania, jednak istnieje w przemyśle szereg innych cieczy stosowanych w tym celu. Tabela 1 przedstawia inne komercyjne cieczy używane do chłodzenia form wtryskowych. Zestawienie przygotowano na podstawie bazy programu Autodesk Moldflow® [9].

**Tabela 1.** Zestawienie wybranych handlowo dostępnych cieczy chłodzących [10–15]

**Tabela 1.** Summary of commercially available coolants (selected examples of individual types of compounds) [10–15]

Grupa cieczy chłodzących	Skład bazowy	Maksymalny zakres temperatury stosowania, °C
Woda	Woda	10–95
Roztwór wody i glikolu etylenowego, 60 % obj. glikolu	Woda, glikol etylenowy	-40–150
Coolanol	Ester krzemianu	-101–288
Mobiltherm	Rafinowany olej mineralny	-15–180 (315 w układzie zamkniętym)
Dowtherm	Bifenyl oraz tlenek difenyli	-35–400
Dowfrost	Glikol propylenowy, woda, fosforan dipotasowy	-45–160
Fluorinert	Perfluorowęglowodory	-80–165

## TRANSPORT CIEPŁA

Zjawisko chłodzenia formy wtryskowej można opisać za pomocą prawa stygnięcia Newtona [16]:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

gdzie:  $q''$  – strumień ciepła ( $W/m^2$ ),  $h$  – współczynnik wnikania ciepła [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ],  $T_s$  – temperatura na powierzchni ciała ( $^\circ C$ ),  $T_\infty$  – temperatura wewnątrz ciała ( $^\circ C$ ) (w rozważanym wypadku temperatura cieczy, oznaczona symbolem  $T_c$ ,  $^\circ C$ ).

Szybkość odprowadzania ciepła jest proporcjonalna do różnicy temperatury między ciałem i otoczeniem. Ze względu na niewielką zmianę temperatury cieczy chłodzącej prawo stygnięcia może być wykorzystane w analizach chłodzenia formy wtryskowej.

Charakter transportu ciepła w cieczy można określić na podstawie bezwymiarowej liczby Prandtla  $Pr$ , zdefiniowanej równaniem:

$$Pr = \frac{C_p \eta}{k} \quad (2)$$

gdzie:  $C_p$  – ciepło właściwe cieczy [ $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ],  $\eta$  – lepkość cieczy ( $Pa \cdot s$ ),  $k$  – współczynnik przewodzenia ciepła [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ] [16].  $Pr$  to parametr materiałowy (w równaniu są ujęte tylko stałe materiałowe), wskazujący na sposób transportu ciepła wewnątrz strumienia cieczy.

Jeżeli wartość liczby Prandtla jest dużo mniejsza niż 1, transport ciepła odbywa się w wyniku przewodzenia, a wartość  $Pr$  dużo większa od 1 oznacza, że transport ciepła odbywa się w wyniku konwekcji.

W rozważanym wypadku lepkość cieczy chłodzącej  $\eta$  opisano równaniem [4]:

$$\eta = c_1 \exp\left(\frac{c_2}{c_3 + T}\right) \quad (3)$$

gdzie:  $c_1$  ( $Pa \cdot s$ ),  $c_2$  ( $^\circ C$ ),  $c_3$  ( $^\circ C$ ) – stałe materiałowe,  $T$  – temperatura cieczy chłodzącej ( $^\circ C$ ).

Równanie to jest wykorzystywane przez oprogramowanie Autodesk Moldflow® do obliczania lepkości cieczy chłodzącej w danej temperaturze.

Liczba Nusselta  $Nu$  (–) ma bezpośrednie zastosowanie do określania współczynnika przewodności cieplnej, będącego miarą skuteczności usuwania ciepła z formy wtryskowej:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

gdzie:  $h$  – współczynnik wnikania ciepła [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ],  $k$  – współczynnik przewodzenia ciepła [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ],  $L$  – wymiar charakterystyczny (w wypadku przepływu przez rurę równy jej średnicy) (m).

Liczba Nusselta, która określa wymianę ciepła na granicy ciecz/ciało stałe w kierunku prostopadłym do powierzchni, jest stosunkiem wielkości transportu ciepła w wyniku konwekcji do wielkości transportu ciepła w wyniku przewodzenia. W wypadku przepływu laminarnego te wielkości są zbliżone, a liczba Nusselta ma wartość równą ok. 1. Większe wartości liczby Nusselta (100–1000) charakteryzują zazwyczaj przepływ turbulentny. W wypadku przepływu przez rurę o przekroju kołowym wartość  $Nu$  wyraża się następująco [równ. (6) – przepływ laminarny przy stałej temperaturze ściany, równ. (7) i (8) – przepływ turbulentny] [16]:

$$Nu = 3,657 \quad (6)$$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (7)$$

$$Nu = \frac{f_D (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{f_D}{8}} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (8)$$

gdzie:  $f_D$  – współczynnik oporu Darcy'ego (–), wykładnik równania przybierający wartość 0,3, gdy ciecz ulega ochłodzeniu oraz 0,4 – gdy ulega podgrzaniu.

Równanie (7) nazywane równaniem Dittusa-Boeltera obowiązuje dla  $Re \geq 10\,000$  oraz  $0,6 \leq Pr \leq 160$ . Za-

stosowanie równ. (7) dla liczby Reynoldsa z przedziału  $4000 < Re < 10\,000$  może skutkować wystąpieniem rozbieżności między wartością rzeczywistą (będzie mniejsza) a wyznaczoną (będzie większa), nawet na poziomie 25 %.

Równanie (8), opracowane przez Gnielinskiego, uwzględnia również zakres przejściowy przepływu i można je stosować dla zakresów  $0,5 \leq Pr \leq 2000$  oraz  $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ , w wypadku, gdy jest konieczna większa dokładność uzyskiwanych wyników [17].

Liczba Reynoldsa  $Re$  określa stosunek sił bezwładnościowych do sił lepkościowych. Wykorzystuje się ją do oceny charakteru przepływu płynów (laminarny, przejściowy, turbulentny) i wyraża wzorem:

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (9)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość cieczy ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  – średnia prędkość przepływu ( $\text{m/s}$ ).

Dla prostego przepływu laminarnego, jakim jest przepływ przez rurę o przekroju kołowym, wyrażenie określające współczynnik oporu  $f_D$  ma postać:

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

Dla zakresu turbulentnego stosuje się przede wszystkim równania:

$$f_D = [0,79 \ln(Re - 1,64)]^2 \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f_D}} \right) \quad (12)$$

$$f_D = 0,25 \left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (13)$$

gdzie:  $D$  – średnica kanału ( $\text{m}$ ),  $\varepsilon$  – chropowatość powierzchni kanału ( $\text{mm}$ ).

Równanie (11), opracowane przez Petukhova, stosuje się w odniesieniu do kanałów gładkich

( $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ ), a równanie (12), zwane równaniem Colebrooka [17], obowiązuje dla  $Re > 4000$  i może być stosowane w odniesieniu do kanałów chropowatych. Ze względu na swoją postać równ. (12) musi być rozwiązywane iteracyjnie. Równanie (13), zwane równaniem Swamee-Jaina, jest częściej stosowane ze względu na jawną postać współczynnika tarcia, co wpływa na mniejszą dokładność obliczeń niż w wypadku stosowania równania (8) [19]. Równanie (13) również jest zaimplementowane w oprogramowaniu Autodesk Moldflow®.

## OPORY PRZEPŁYWU

Przepływ płynów jest możliwy dzięki różnicy ciśnień między dwoma punktami. W wypadku przepływu cieczy przez rurę stosuje się równanie Darcy'ego-Weisbacha [18]:

$$\frac{\Delta p}{L_p} = f_D \frac{1}{2g} \frac{v^2}{D} \quad (14)$$

gdzie:  $\Delta p$  – spadek ciśnienia ( $\text{Pa}$ ),  $L_p$  – długość rury ( $\text{m}$ ),  $f_D$  – współczynnik oporu Darcy'ego,  $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $\text{m/s}^2$ ).

Znając wielkość oporów tarcia i geometrii układu chłodzenia, można wyznaczyć wpływ parametrów nastawnych (temperatury chłodziwa oraz prędkości przepływu) na wielkość spadków ciśnienia podczas przepływu cieczy w formie wtryskowej.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

Analizy przeprowadzono z zastosowaniem kilku rodzajów chłodziw, scharakteryzowanych w tabeli 2.

Korzystając z równań (1)–(4), (7), (9), (13)–(14), przeprowadzono analizy, które miały na celu określenie wpływu temperatury użytej cieczy chłodzącej oraz prędkości jej

**T a b e l a 2.** Dane materiałowe użytych w badaniach handlowo dostępnych cieczy chłodzących (wybrane przykłady poszczególnych rodzajów związków) [9]

**T a b l e 2.** Summary of material data of commercial available coolants (selected examples of individual types of compounds) [9]

Numer próbki	Rodzaj cieczy chłodzącej (udział w roztworach wyrażony objętościowo)	Gęstość $\rho$ $\text{g/cm}^3$	Ciepło właściwe $C_p$ $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	Współczynnik przewodzenia ciepła $k$ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	Parametry lepkościowe		
					$c_1$ , $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$c_2$ , $^\circ\text{C}$	$c_3$ , $^\circ\text{C}$
1	Woda	0,9880	4180	0,64300	2,86E-05	510,7	123,7
2	20 % Roztwór wodny glikolu etylenowego	1,0230	3943	0,55000	3,98E-05	571,7	133,1
3	40 % Roztwór wodny glikolu etylenowego	1,0510	3537	0,45800	6,93E-05	571,3	133,1
4	60 % Roztwór wodny glikolu etylenowego	1,0760	3131	0,36800	1,27E-04	572,2	133,2
5	Fluorinert FC 75	1,6580	1110	0,06025	2,45E-04	144,5	56,7
6	Coolanol 25	0,8750	2008	0,12800	8,05E-04	110,4	39,1
7	Mobiltherm 600	0,8861	2082	0,11910	6,22E-05	806,9	80,7
8	75 % Dowfrost i 25 % glikolu etylenowego	1,0100	3977	0,48040	2,49E-05	660,5	123,9



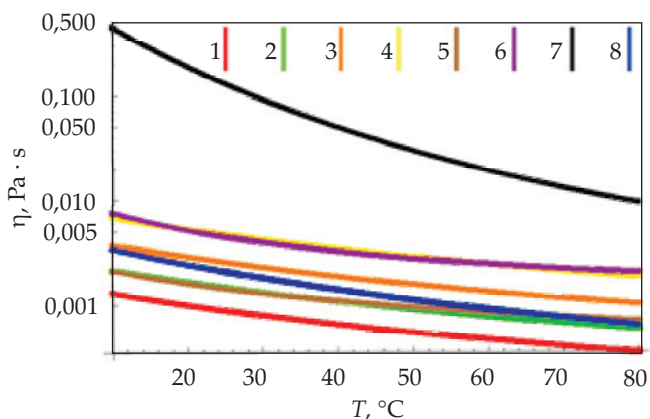
przepływu na wydajność chłodzenia oraz na spadki ciśnienia tej cieczy w kanałach chłodzących.

### Metodyka badań

Z zastosowaniem równania (3) analizowano zależność lepkości cieczy chłodzących od temperatury, a następnie, podstawiając do równania (9) wyniki z równania (3), badano zależność między liczbą Reynoldsa i temperaturą cieczy chłodzącej oraz objętościowym natężeniem przepływu (do obliczeń przyjęto prędkość przepływu w kanale chłodzącym o średnicy  $D = 10$  mm).

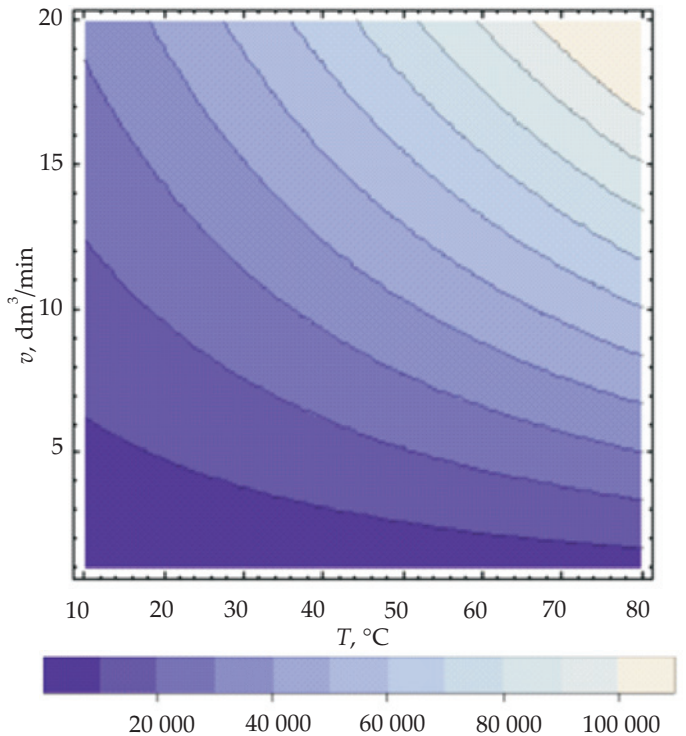
Na kolejnym etapie obliczano współczynnik wnikania ciepła. Podstawiono dane materiałowe [w tym lepkość z równania (3)] do równania (2) i wyznaczono liczbę Prandtla. Wyniki z równań (2) oraz (9) wykorzystano do wyznaczenia liczby Nusselta za pomocą równania (7), a obliczoną wartość podstawiono do zależności (4), z której wyznaczono współczynnik wnikania ciepła. W rozważaniach należy uwzględnić fakt, że w równaniu (1), oprócz współczynnika wnikania ciepła, występuje różnica temperatury na powierzchni oraz wewnątrz formy wtryskowej. Iloczyn tych parametrów określa skuteczność odbioru ciepła, przy czym bez analizy konkretnego przypadku za pomocą metod numerycznych wartość ta jest niewyznaczalna, ponieważ proces wtryskiwania tworzyw polimerowych jest procesem niestacjonarnym.

Określono również wartość spadków ciśnienia na jednostkę długości  $\Delta p/L$ , w odniesieniu do chropowatości ściany kanału chłodzącego  $\varepsilon = 0,05$  mm oraz średnicy kanału chłodzącego  $D = 10$  mm, dla różnych wartości temperatury cieczy oraz jej objętościowego natężenia przepływu wyrażonego w  $\text{dm}^3/\text{min}$  (jest to wielkość wykorzystywana w przemyśle). W tym celu dane uzyskane z równania (9) podstawiono do równania (12) i obliczono współczynnik oporu  $f_D$ . Jego wartość podstawiono do równania (14) i wyznaczono spadek ciśnienia na jednostkę długości kanału chłodzącego. Obliczenia przeprowadzono w programie Wolfram Mathematica®.



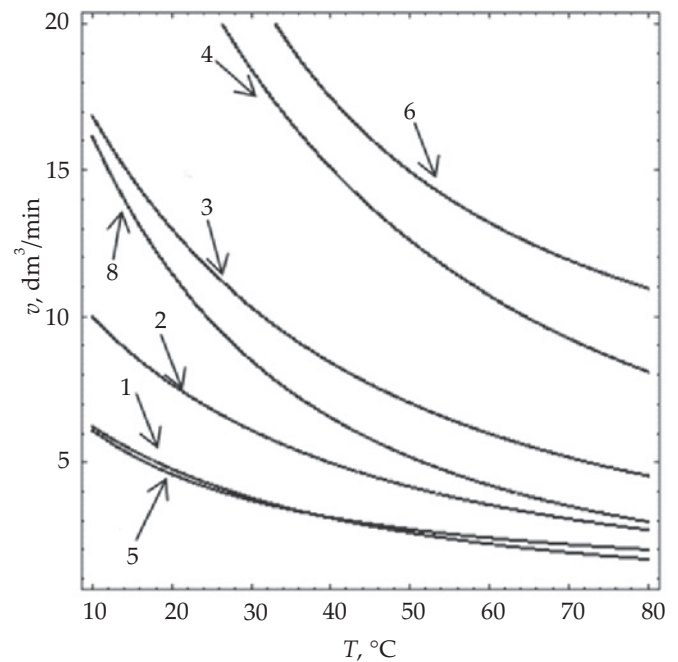
Rys. 1. Zależność lepkości cieczy chłodzących od temperatury, numery próbek zgodne z opisem w tabeli 2

Fig. 1. Relation between viscosity and temperature of coolants; sample numbers are described in Table 2



Rys. 2. Wykres konturowy zmian liczby Reynoldsa ( $Re$ ) w funkcji temperatury cieczy chłodzącej (wody) ( $T$ ) oraz jej objętościowego natężenia przepływu ( $v$ )

Fig. 2. Contour plot of changes in Reynolds number ( $Re$ ) as a function of coolant (water) temperature ( $T$ ) and its volume flow rate ( $v$ )



Rys. 3. Krzywe zależności temperatury ( $T$ ) i objętościowego natężenia przepływu ( $v$ ) analizowanych cieczy chłodzących, wyznaczone dla liczby Reynoldsa  $Re = 10\ 000$

Fig. 3. Diagram of relation between temperature ( $T$ ) and volume flow rate ( $v$ ) of analyzed coolants determined for Reynolds number  $Re = 10\ 000$

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Podstawowym czynnikiem wpływającym zarówno na intensywność odbioru ciepła z formy wtryskowej, jak i na spadek ciśnienia jest lepkość cieczy chłodzącej. Zmiany lepkości cieczy w funkcji temperatury przedstawiono na rys. 1. Skala na osi Y wykresu jest logarytmiczna ze względu na dużo większą lepkość chłodziwa na bazie oleju mineralnego, niż lepkość pozostałych analizowanych cieczy chłodzących. Stwierdzono, że woda w porównaniu z pozostałymi chłodziwami wykazuje najmniejszą lepkość. Lepkość pozostałych cieczy chłodzących (oprócz Mobilthermu, którego lepkość w temperaturze 10 °C wynosi ok. 0,5 Pa · s) przybiera wartości z przedziału 0,001–0,01 Pa · s. We wszystkich analizowanych wypadkach wzrost temperatury powoduje kilkukrotne zmniejszenie lepkości cieczy chłodzącej, największe w odniesieniu do Mobilthermu, stosowanego do chłodzenia form wtryskowych o wysokiej temperaturze.

Kolejnym bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na skuteczność chłodzenia jest wartość liczby Reynoldsa, określająca rodzaj przepływu cieczy. Wykres konturowy zmiany liczby Reynoldsa w funkcji temperatury oraz objętościowego natężenia przepływu wody przedstawia rys. 2, z którego wynika, że zwiększenie wartości zarówno jednego, jak i drugiego parametru powoduje wzrost liczby  $Re$ . Na rys. 3 przedstawiono krzywe wyznaczające wartości objętościowego natężenia przepływu i temperatury analizowanych chłodziw, dla których liczba Reynoldsa jest równa 10 000.

Stwierdzono, że woda oraz Fluorinert FC 75 są cieczami osiągającymi założoną wartość liczby Reynoldsa (10 000) w warunkach najmniejszego objętościowego natężenia przepływu, a największe objętościowe natężenie przepływu jest konieczne w wypadku 60 % roztworu glikolu etylenowego w wodzie oraz cieczy Coolanol 25. Wzrost temperatury wody wyraźnie zwiększa jej wartość  $Re$ , ale dopiero w odniesieniu do większych wartości natężenia przepływu. Większą wrażliwość (rozumianą jako większy przyrost wartości w funkcji danej zmiennej) na zmiany temperatury wykazywały ciecze nr 3, 4, 6 i 8 (oznaczenia z tabeli 2), w wypadku których mniejszy wzrost temperatury powodował przyrost liczby Reynoldsa większy niż pozostałych cieczy. W odniesieniu do cieczy nr 7 (Mobiltherm 600, tabela 2) w badanym zakresie temperatury cieczy oraz objętościowego natężenia przepływu nie uzyskano prędkości przepływu odpowiadającej liczbie Reynoldsa równej 10 000, największa wartość  $Re$  w tym wypadku wynosiła ok. 4000. Dopiero zwiększenie temperatury cieczy nr 7 do 120 °C w warunkach objętościowego natężenia przepływu równego 20 dm<sup>3</sup>/min pozwoliło osiągnąć wartość  $Re$  ok. 10 000, co ustalono na podstawie obliczeń numerycznych. Z analizy cieczy nr 2, 3 i 4 wynika, że zwiększenie wrażliwości na zmianę temperatury następuje ze zwiększającą się zawartością glikolu (przy jednoczesnym wyraźnym zwiększeniu prędkości przepływu, aż do osiągnięcia przepływu w pełni turbulentnego).

Rysunek 4 przedstawia zależność współczynnika wnikania ciepła ( $h$ ) od objętościowego natężenia przepływu oraz od temperatury cieczy chłodzącej. Na jej podstawie stwierdzono, że najskuteczniejszym chłodziwem będzie woda, następnie Fluorinert FC 75 oraz 20 % roztwór wodny glikolu etylenowego. Pozostałe analizowane ciecze wykazują wyraźnie mniejszą skuteczność chłodzenia, przy czym najmniej skutecznie przebiega chłodzenie za pomocą Mobilthermu. Przy założeniu uzyskania wartości  $Re = 10\ 000$ , jako wystarczającej do chłodzenia optymalnego, zaobserwowano, że w wypadku większości cieczy chłodzących (poza FC 75, Coolanolem 25 oraz Mobilthermem 600) współczynnik wnikania ciepła jest większy niż  $h$  wody. Większe wartości  $h$  odpowiadają większemu objętościowemu natężeniu przepływu i wyższej temperaturze chłodziwa.

Skuteczny odbiór ciepła zależy nie tylko od wartości współczynnika wnikania ciepła, ale także od różnicy temperatury [równanie (1)] powierzchni i wnętrza chłodzonego ciała. Zastosowanie możliwie niskiej temperatury cieczy chłodzącej będzie miało większy wpływ na wydajność chłodzenia niż zwiększenie wartości współczynnika wnikania ciepła, związane z wyższą temperaturą cieczy chłodzącej (przy zachowaniu tej samej wartości  $Re$ ). Z tego względu dla porównania cieczy chłodzących wykorzystano najniższą badaną temperaturę chłodziwa (10 °C) oraz wartość  $Re = 10\ 000$ . W takich warunkach największą skutecznością chłodzenia, określaną na podstawie wartości współczynnika wnikania ciepła, cechuje się roztwór 75 % Dowfrost + 25 % glikol etylenowy, a nieznacznie mniejszą – 40 % roztwór wodny glikolu etylenowego.

Duże wartości objętościowego natężenia przepływu wiążą się z dużymi różnicami ciśnienia cieczy na wejściu i na wyjściu z układu chłodzenia. Na rys. 5 przedstawiono zależność spadku ciśnienia na jednostkę długości od objętościowego natężenia przepływu oraz temperatury cieczy chłodzącej. Najmniejsze spadki ciśnienia występują w wypadku użycia wody, dzięki temu najszybciej uzyskuje się zakładaną liczbę Reynoldsa  $Re = 10\ 000$ . Największe opory przepływu wykazuje Mobiltherm.

Biorąc pod uwagę zawartość glikolu w roztworze wodnym można zauważyć, że zwiększenie udziału glikolu w wodzie w niewielkim stopniu zwiększa wartości spadków ciśnienia, powoduje też jednak wyraźne pogorszenie skuteczności odbioru ciepła.

Porównywanie skuteczności odbioru ciepła przez różne chłodziwa przy tej samej liczbie Reynoldsa, może być mylące ze względu na to, że poszczególne ciecze chłodzące uzyskują taką samą wartość  $Re$  w różnych warunkach temperatury i objętościowego natężenia przepływu. Wzrost temperatury powoduje zmniejszanie się oporów przepływu cieczy, dlatego też wartości liczby  $Re$  nie powinny być większe niż 10 000. Okazuje się jednak, że w wyższej temperaturze cieczy chłodzącej z powodzeniem można zwiększyć natężenie przepływu i przekroczyć  $Re = 10\ 000$ , co pozwala istotnie zwiększyć skuteczność



