WPŁYW RADIACYJNEJ WYMIANY CIEPŁA NA ROZKŁAD TEMPERATURY NA POWIERZCHNI PŁASZCZA NAPOWIETRZNEGO RUROCIĄGU CIEPŁOWNICZEGO W WARUNKACH NISKIEJ TEMPERATURY NIEBOSKŁONU

TADEUSZ KRUCZEK^{1/}, ADAM FIC^{1/}

^{1/}Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska e-mail: tadeusz.kruczek@polsl.pl, adam.fic@polsl.pl

<u>Streszczenie</u> Pomiędzy rurociągiem ciepłowniczym a jego otoczeniem występuje konwekcyjna i radiacyjna wymiana ciepła. Zjawiska te mają wpływ na straty ciepła z rurociągu. Radiacyjna wymiana ciepła ma szczególnie istotne znaczenie w warunkach niskiej temperatury nieboskłonu, skutkując czasem pojawieniem się na zewnętrznym płaszczu rurociągu temperatury niższej od temperatury otaczającego powietrza. W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznej wymiany ciepła dla rurociągu eksperymentalnego w wymienionych wyżej warunkach. Wykorzystano w tym celu pakiet CFD ANSYS-FLUENT. Rezultaty obliczeń porównano z wynikami pomiarów.

1. WSTĘP

Straty ciepła z napowietrznych rurociągów ciepłowniczych są ważnym problemem praktycznym. Zależą one przede wszystkim od zastosowanej izolacji cieplnej i jej aktualnego stanu. Stan aktualny izolacji i straty ciepła z rurociągu mogą być identyfikowane za pomocą pomiarów termograficznych. Badanie takie jest jednak utrudnione przez złożoność wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni rurociągu. Na wspomniane straty ciepła mają bowiem wpływ nie tylko opory przewodzenia ciepła w izolacji, ale także konwekcyjna i radiacyjna wymiana ciepła pomiędzy zewnętrzną powierzchnią rurociągu i otoczeniem. Radiacyjna wymiana ciepła sprawia, że temperatura na zewnętrznej powierzchni rurociągu, nawet z nową izolacją, jest bardzo zróżnicowana. Przykładowo, w pogodne noce temperatura w górnej części tej powierzchnia rurociągu wymienia bowiem radiacyjnie ciepło z podłożem, otaczającym powietrzem i nieboskłonem, których temperatury są bardzo zróżnicowane.

Celem badań, których wyniki są prezentowane w tej pracy, jest identyfikacja wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni napowietrznego rurociągu ciepłowniczego. W związku z tym opracowano model numeryczny wymiany ciepła w układzie rurociąg ciepłowniczy – otoczenie. Model uwzględnia przewodzenie ciepła wewnątrz rurociągu oraz konwekcyjną i radiacyjną wymianę ciepła pomiędzy jego zewnętrzną powierzchnią oraz otoczeniem. Został on opracowany na platformie kodu CFD ANSYS-FLUENT 12.1.4, [1]. Do jego walidacji wykorzystano pomiary wykonane na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku pomiarowym.

Wspomniane wyżej stanowisko eksperymentalne pokazano na rys. 2. Zostało ono ustawione na tarasie budynku, pokazanym na rys. 3. Usytuowanie to ma wpływ na promienistą wymianę ciepła pomiędzy powierzchnią rurociągu, będącego podstawowym elementem stanowiska a otoczeniem. Rurociąg ten ma długość 1,8 m, a jego oś znajduje się 2 m ponad podłoga tarasu. Składa się on z wewnętrznej rury o średnicy zewnętrznej 273 mm i grubości ścianki 2 mm, warstwy izolacji o grubości 100 mm oraz stalowego zewnętrznego płaszcza. Płaszcz zewnętrzny jest pomalowany matową farbą o dość wysokiej emisyjności, zbliżonej do emisyjności powierzchni płaszczy rurociagów po wieloletnim okresie eksploatacji. Rura wewnętrzna jest równomiernie powierzchniowo ogrzewana za pomocą zestawu elektrycznych grzejników. Temperatura ścianki rury wewnętrznej i zewnętrznego płaszcza jest mierzona za pomocą szeregu termoelementów rozmieszczonych równomiernie na obwodzie, 10 na ściance rury wewnętrznej i po 10 w dwóch okregach na płaszczu zewnętrznym. Temperatury te, jak również temperatura powietrza, prędkość i kierunek wiatru 2 m ponad rura (rys. 2), były rejestrowane co 5 min przez system komputerowy. Temperatury powierzchni balkonu, sąsiadujących ścian oraz pozorna temperatura nieboskłonu były mierzone za pomoca kamery termowizyjnej.



Rys. 1. Przykładowe zdjęcie termowizyjne rurociągu ciepłowniczego, temperatura powietrza: 4,8 °C, temperatura nieboskłonu: -9,6 °C



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe



Rys. 3. Otoczenie stanowiska pomiarowego ustawionego na wskazanym tarasie budynku

2. OPIS MODELU NUMERYCZNEGO

Transport energii w układzie rura stanowiska eksperymentalnego – otoczenie jest modelowany w pracy głównie w stanie ustalonym, w geometrii 3D. Obszar obliczeniowy obejmuje rurociąg stanowiska (stalowa wewnętrzna rura, izolacja, szczelina powietrzna oraz stalowa powłoka zewnętrzna) i jego otoczenie. Zewnętrzne powierzchnie brzegowe obszaru obliczeniowego stanowią podłoga i ściany tarasu budynku, jego dach oraz sztuczne powierzchnie ograniczające półprzestrzeń powietrza otoczenia. Przekrój poprzeczny obszaru obliczeniowego, prostopadły do osi rury, pokazano na rys. 4. Założono, że powietrze dopływa do obszaru obliczeniowego poziomo prostopadle do rury z prędkością v_{in} , temperaturą t_{in} (warunek brzegowy "velocity inlet" na powierzchniach In1 ÷ In4 na rys. 4), a wypływa przez pozostałe powierzchnie ograniczające obszar powietrza otaczającego rurę (warunek brzegowy

"pressure outlet" na powierzchniach Out1 ÷ Out7 oraz na powierzchni czołowej obszaru naprzeciw ściany i dachu budynku). Na powierzchni wewnętrznej rury oraz na powierzchniach zewnętrznych obszaru obliczeniowego założono znaną temperaturę. Przyjęto, że przepływ powietrza jest przepływem burzliwym Newtonowskiego gazu doskonałego, a powietrze jest przeźroczyste dla promieniowania. Przepływ ciepła przez promieniowanie zewnetrzna wystepuje natomiast pomiedzy powierzchnią rury. nieboskłonem (powierzchniami ograniczającymi półprzestrzeń w modelu), ścianą i dachem budynku oraz podłoga tarasu. Rozpatrywany problem jest wówczas opisany za pomoca równań: ciagłości, momentów Reynoldsa, bilansu energii, opisu transportu promieniowania, modelu turbulencji, warunków brzegowych.

Sformułowany problem rozwiązano za pomocą komercyjnego pakietu CFD ANSYS-FLUENT 12.1.4 [1]. Wykorzystywano standardowy model $k - \varepsilon$ turbulencji lub zakładano przepływ laminarny powietrza oraz stosowano zaimplementowaną w kodzie FLUENT metodę S2S modelowania transportu promieniowania cieplnego (metoda jasności wyznaczania radiacyjnych strumieni ciepła pomiędzy elementami powierzchni ograniczających obszar obliczeniowy płynu).

Dodatkowego objaśnienia wymaga problem określenia temperatury powierzchni ograniczających półprzestrzeń powietrza (włoty i wyloty powietrza), poprzez które z obszaru obliczeniowego "widziany" jest nieboskłon. Przez te powierzchnie transportowane jest promieniowanie cieplne z obszaru obliczeniowego na zewnątrz oraz dociera promieniowanie cieplne do wnętrza obszaru. Pozorna temperatura nieboskłonu widzianego przez te powierzchnie, gdy patrzy się od strony rury, jest mierzona za pomocą kamery termowizyjnej. Wykorzystywana w tym celu kamera pracuje, mierząc promieniowanie o długościach fali z przedziału (7,5 \div 13) µm, tj. w przedziale najszerszego "okna" dla promieniowania cieplnego w wilgoci powietrza. Według [2] pasma promieniowania dla H₂O są bowiem następujące: (1,7 – 2,0), (2,2 – 3,0), (4,8 – 7,5), (12 – 30) µm. Z drugiej strony obliczenia testowe wykazały, że jeśli założyć dla wspomnianych zewnętrznych powierzchni obszaru obliczeniowego temperatury zmierzone za pomocą kamery termowizyjnej, to obliczeniowe temperatury górnej części powierzchni zewnętrznego płaszcza rurociągu są o około 10 K niższe od zmierzonych (rys. 5.). Wyjaśnić to można, analizując transport promieniowania cieplnego w rozpatrywanym obszarze.

Do powierzchni zewnętrznej rury, poprzez powierzchnie ograniczające półnieskończone otoczenie stanowiska, od strony nieboskłonu dociera pierwszy strumień promieniowania o intensywności właściwej dla pozornej temperatury nieboskłonu zmierzonej kamerą. Przyjmuje się, że jest to promieniowanie z zakresów widma Plancka odpowiadających przedziałom "okien" dla promieniowania cieplnego pary wodnej (pasma promieniowania dla CO_2 , poza jednym (4,0 – 4,8) µm, stosunkowo wąskim, pokrywają się praktycznie z pasmami dla H_2O i dlatego fakt ten pominięto). Ponadto do rury dociera promieniowanie emitowane przez drobiny H_2O zawarte w powietrzu w odległości kilku metrów od niej. Jest to drugi strumień promieniowania, emitowanego przez drobiny pary wodnej o temperaturze otaczającego rurę powietrza w zakresie pasm promieniowania H_2O . Stosując metodę S2S obliczeń transportu promieniowania za pomocą kodu FLUENT, powierzchniom ograniczającym półprzestrzeń otoczenia stanowiska pomiarowego (wloty i wyloty powietrza) przyporządkowano zastępcze temperatury dla wymiany ciepła przez promieniowanie, biorąc pod uwagę powyższe okoliczności. Sposób obliczenia wymienionych temperatur zastępczych przedstawiono w dalszej części artykułu.

Jeśli rozpatrywać radiacyjną wymianę ciepła pomiędzy elementem S_1 zewnętrznej powierzchni rury i elementem S_2 powierzchni ograniczającej obszar obliczeniowy od strony nieboskłonu, radiacyjny strumień ciepła oddawany przez S_1 jest równy [2]

T. KRUCZEK, A. FIC

$$\dot{Q}_{r1} = \dot{H}_1 - \dot{B}_1$$
 (1)

gdzie jasność \dot{H}_1 powierzchni S₁ jest zdefiniowana wzorem

$$\dot{H}_1 = \varepsilon_1 \dot{E}_{b1} + (1 - \varepsilon_1) \dot{B}_1 \tag{2}$$

zaś jej opromieniowanie \dot{B}_1 przy założeniu, że powierzchnie otaczające niewklęsłą powierzchnię "1" są doskonale czarne

$$\dot{B}_{1} = \varphi_{21} \dot{E}_{b2} + \sum_{s=3}^{n} \varphi_{s1} \dot{H}_{bs}$$
(3)

gdzie sumowanie rozciąga się po powierzchniach s=3, ..., n, z którymi element powierzchni S₁ wymienia ciepło przez promieniowanie, ε_i jest emisyjnością powierzchni i, φ_{i-j} współczynnikiem konfiguracji powierzchni i oraz j, zaś \dot{E}_b emisją własną powierzchni ciała doskonale czarnego i wynika z zależności

$$\dot{E}_b = A \ \dot{e}_b \tag{4}$$

W powyższym wzorze A jest polem powierzchni ciała, zaś

$$\dot{e}_b = \int_0^\infty \dot{e}_{b\lambda}(T) \, \mathbf{d}\,\lambda = C_c \left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{5}$$

gdzie $\dot{e}_{b\lambda}$ jest widmem Plancka gęstości emisji ciała doskonale czarnego [2], *T* temperaturą w stopniach Kelvina, natomiast $C_c = 5,67$ W/(m² K⁴) stałą Stefana-Bolzmanna ciała doskonale czarnego.



Rys. 4. Obszar obliczeniowy 2D, przekrój poprzeczny obszaru 3D oraz warunki brzegowe

Podstawiając powyższe zależności do równania (1), otrzymuje się

$$\dot{Q}_{r1} = \varepsilon_1 \left(A_1 \ \dot{e}_{b1} - A_2 \ \varphi_{21} \ \dot{e}_{b2} - \sum_{s=3}^n \varphi_{s1} \ \dot{H}_{bs} \right)$$
(6)

Biorąc pod uwagę wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące promienistej wymiany ciepła pomiędzy rurą i otoczeniem, w tym z nieboskłonem, gęstość emisji \dot{e}_{b2} elementu przykładowej powierzchni S₂ ograniczającej półnieskończony obszar obliczeniowy wynosi

$$\dot{e}_{b2} = C_c \left[r_w(T_{nb}) \left(\frac{T_{nb}}{100} \right)^4 + r_w(T_{At}) \left(\frac{T_{At}}{100} \right)^4 \right]$$
(7)

gdzie $r_w(T_{nb})$ jest udziałem energii promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne o temperaturze nieboskłonu T_{nb} zmierzonej za pomocą kamery, którego długości fali zawierają się w przedziałach "okien" w powietrzu wilgotnym. Przyjęty w obliczeniach, zmodyfikowany nieco w stosunku do podawanego w literaturze [2] przedział "okien" jest następujący: $\Delta \lambda_w = (0; 1,7) \cup (2; 2,2) \cup (3; 4,8) \cup (7,5; 13) \cup (30; \infty) \mu m$. Modyfikacja wynika z podanego przez producenta kamery jej zakresu spektralnego równego (7,5 ÷ 13) µm. Udział r_w wynosi

$$r_{w}(T_{nb}) = \frac{\int \dot{e}_{b\lambda}(T_{nb}) \, \mathbf{d} \, \lambda}{\int_{0}^{\infty} \dot{e}_{b\lambda}(T_{nb}) \, \mathbf{d} \, \lambda}$$
(8)

natomiast $r_w(T_{At})$ jest udziałem energii promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne o temperaturze T_{At} otaczającego powietrza atmosferycznego, którego długości fali zawierają się pasmach promieniowania dla pary wodnej (zawartej w powietrzu), tj w obszarze $\Delta\lambda_{At} = (1,7; 2,0) \cup (2,2; 3,0) \cup (4,8; 7,5) \cup (13, 30) \mu m$. Udział ten jest określony następująco

$$r_{w}(T_{At}) = \frac{\int \dot{e}_{b\lambda}(T_{At}) \, \mathbf{d} \, \lambda}{\int_{0}^{\infty} \dot{e}_{b\lambda}(T_{At}) \, \mathbf{d} \, \lambda}$$
(9)

Model S2S zaimplementowany w pakiecie ANSYS-FLUENT wymaga wprowadzenia jako danej temperatury T_2 powierzchni S₂ celem obliczenia gęstości jej emisji własnej

$$\dot{e}_{b\,2} = C_c \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \tag{10}$$

Jest to temperatura zastępcza powierzchni S₂. Porównując (7) i (10), jej wartość określona jest następująco

$$T_2 = 100 \left[r_w(T_{nb}) \left(\frac{T_{nb}}{100} \right)^4 + r_w(T_{At}) \left(\frac{T_{At}}{100} \right)^4 \right]^{1/4}$$
(11)

3. REZULTATY OBLICZEŃ

Wstępne obliczenia wymiany ciepła pomiędzy rurą stanowiska pomiarowego i otoczeniem wykonano w układzie 2D [3] dla stanu ustalonego. Obszar obliczeniowy o rozmiarach 14×9 m zawierał w środku rurę stanowiska pomiarowego umieszczoną 2 m ponad podłogą balkonu (rys. 4). Strukturalna siatka zawierała około 70 000 elementów czworokatnych. W rurociągu uwzględniono wewnętrzną rurę stalową, warstwę izolacji, szczelinę powietrzną i zewnętrzny płaszcz stalowy. Dla występujących w obszarze materiałów przyjęto typowe stałe termofizyczne, przy czym współczynnik przewodzenia ciepła dla izolacji zależny od temperatury według danych producenta wynosił $\lambda = 0,05247 - 1,728 \cdot 10^{-4} T + 4,0561 \cdot 10^{-7} T^2$, W/(m·K). Emisyjność dla zewnętrznej powierzchni rury przyjęto 0,94, zaś dla podłogi tarasu i jego ścian równą 1,0. Obliczenia wykonano dla warunków występujących o godz. 23.25 w dniu 26 czerwca 2009 r. Wiatr wiał prostopadle do rury od prawej strony (rys. 3), natomiast zmierzona prędkość wiatru wynosiła 0,3 m/s. Na brzegu obszaru założono więc jego prędkość równa 0,25 m/s, by otrzymać wartość obliczeniowa w punkcie pomiarowym równa wartości zmierzonej. Z uwagi na niewielkie prędkości powietrza jego przepływ modelowano jako laminarny. Na powierzchni wewnętrznej rury założono warunek brzegowy I rodzaju (ze zróżnicowaną temperaturą na jej obwodzie zgodnie pomiarami termoelementowymi zarejestrowanymi przez układ komputerowy). Temperatura powietrza wynosiła 19,5 °C, natomiast wartości temperatury podłogi tarasu oraz temperatury nieboskłonu widzianego poprzez powierzchnie pokazane na rys. 4, zamieszczono w tabl. 1 wariant 1 (war. 1).

Wybrane wyniki obliczeń uzyskane dla rozpatrywanych wariantów pokazano na rys. 5 wraz z wynikami pomiarów. Rysunek ten przedstawia wykresy temperatury na obwodzie zewnętrznego płaszcza rurociągu w funkcji kąta mierzonego od góry w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Temperatura nieboskłonu w rozpatrywanym przypadku jest stosunkowo niska (bezchmurna pogoda) i w związku z tym temperatura w górnej części rury jest niższa o ponad 1 K od temperatury otaczającego powietrza.

Wariant	Symbol elementu / Temperatura, °C											
	Inl	In2	In3	In4	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6	Out7	floor
1	19,6	17,1	12,6	-7,9	-14,0	-15,4	-12,9	-0,5	8,6	18,1	19,6	20,1
2	19,6	18,3	16,1	6,9	4,5	4,0	4,9	10,1	14,2	18,8	19,6	20,1
3	19,6	18,7	17,2	10,7	9,0	8,6	9,3	12,9	15,8	19,1	19,6	20,1

Tabela 1. Pomiarowe wartości temperatury podłogi, nieboskłonu oraz zastępcze temperatury powierzchni wyróżnionych elementów dla przyjętych wariantów (war. 1, war. 2, war. 3)



Rys. 5. Temperatury eksperymentalne (pomiar 26.06.2009, godz. 23.25) i obliczeniowe (stan ustalony, 2D) na zewnętrznej powierzchni rurociągu stanowiska pomiarowego w funkcji kąta mierzonego od góry w kierunku przeciwnym do obrotu wskazówek zegara

W wariancie 1 na powierzchniach S_2 (wloty i wyloty powietrza) ograniczających półprzestrzeń założono zmierzone wartości temperatury nieboskłonu (war. 1, tabl. 1). Jak widać, temperatury obliczeniowe w górnej części rury (0 i 360°) są wyraźnie niższe od zmierzonych. W górnym punkcie różnica ta sięga 13 K.

W wariancie 2 (war. 2) założono na tych powierzchniach temperatury obliczone przy zastosowaniu wzoru (11). Rozbieżność pomiędzy temperaturami obliczeniowymi i zmierzonymi ulega wyraźnemu zmniejszeniu. W dalszym ciągu jednak maksymalna różnica pomiędzy tymi temperaturami występująca w górnej części rury jest duża, ponieważ wynosi ponad 4 K. Jedną z przyczyn tych rozbieżności może być sąsiedztwo ściany budynku i dachu, których temperatura jest zbliżona raczej do temperatury otoczenia, a nie nieboskłonu.

W wariancie 3 skorygowano więc temperaturę zastępczą elementów powierzchni S_2 (war. 3), szacując wpływ sąsiedztwa tych ścian. Rozbieżność pomiędzy temperaturami zmierzonymi i obliczeniowymi uległa dalszemu zmniejszeniu (patrz: rys. 5, war. 3).

W wariancie 4 (war. 4) przyjęto, że temperatura nieboskłonu jest równa temperaturze powietrza w otoczeniu rury. Taka sytuacja może wystąpić podczas mglistej pogody. Obliczeniowe temperatury powierzchni zewnętrznej rury są wówczas wyraźnie wyższe od temperatury otoczenia. Najmniejsza różnica pomiędzy tymi temperaturami występuje zgodnie z oczekiwaniem dla kąta 90°, tj. w punkcie powierzchni, do którego struga powietrza dopływa prostopadle i gdzie występują najwyższe wartości współczynnika wnikania ciepła.

Należy podkreślić, że wpływ sąsiedztwa ścian na wyniki prezentowanych obliczeń można uwzględnić dokładniej, wykonując obliczenia w układzie 3D. Ponadto, model dwuwymiarowy byłby adekwatny do sytuacji, w której nieskończenie długa rura jest umieszczona w długim tunelu o przekroju poprzecznym, jak pokazano na rys. 4, a poszczególne nieskończenie długie powierzchnie włotowe i wylotowe (In i Out na rys. 3) byłyby izotermiczne. Jest to niezgodne z rzeczywistością. Temperatura nieboskłonu zależy bowiem wyraźnie od kierunku patrzenia, głównie od kąta mierzonego w stosunku do pionu. Również z tego powodu dokładniejsze symulacje wymiany ciepła pomiędzy rozpatrywaną rurą i otoczeniem powinny być wykonywane w układzie 3D. W kolejnym kroku opracowano model 3D rury stanowiska pomiarowego i jej otoczenia oraz wykonano obliczenia analogiczne do poprzednich.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny i współosiowy w stosunku do rury trójwymiarowego obszaru obliczeniowego

Rys. 7. Przekrój współosiowy trójwymiarowego obszaru obliczeniowego wraz siatką

Przekrój trójwymiarowego obszaru obliczeniowego w kierunku poprzecznym do osi rury i przekrój pionowy współosiowy pokazano na rys. 6, zaś przekrój współosiowy z siatką przedstawiono na rys. 7. Obszar zawiera około 480 000 elementów. Warunki brzegowe w przekroju poprzecznym pokazano na rys. 4.

Na rys. 8 zamieszczono wykres rozkładu temperatury uzyskanego w obliczeniach 3D na obwodzie w środku odcinka pomiarowego rury, dla tych samych warunków jak omawiane

wcześniej obliczenia 2D. Uzyskany rozkład jest dość zbliżony do uzyskanego w układzie 2D w wariancie 3 (war. 3), w którym skorygowano w sposób przybliżony temperaturę powierzchni S₂ ze względu na sąsiedztwo ściany budynku i dachu. Rozkład temperatury otrzymany w obliczeniach 3D jest więc w dalszym ciągu niezadowalający ze względu na zbyt dużą rozbieżność pomiędzy temperaturą obliczeniową i zmierzoną w górnej części płaszcza rury (różnica wynosi około 2 K). Wykonano także dodatkowe obliczenia 3D dla podwyższonego o 10% współczynnika przewodzenia ciepła izolacji [4]. Zaciśnięcie montażowe izolacji powoduje bowiem podwyższenie jej współczynnika przewodzenia ciepła. Nie spowodowało to jednak istotnego zmniejszenia niezgodności temperatury obliczeniowej i pomiarowej na powierzchni rury. Nie wydaje się więc, by przyczyną niezgodności tych rozkładów temperatury był niewłaściwie przyjęty współczynnik przewodzenia ciepła dla izolacji cieplnej rurociągu.



Rys. 8. Temperatury pomiarowe (26.06.2009, godz. 23.25) i obliczeniowe (stan ustalony, obliczenia 2D -war. 3, 3D oraz 3D ze współczynnikiem przewodzenia ciepła λ izolacji podwyższonym o 10 %,) na zewnętrznej powierzchni rurociągu stanowiska pomiarowego w funkcji kąta mierzonego od góry w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara

Kolejną przyczyną niezgodności pomiarowych i obliczeniowych rozkładów temperatury może być to, że porównywano wyniki obliczeń rozkładów temperatury na zewnętrznej powierzchni rurociągu z wynikami pomiarów o godz. 23.25. Poprzedzający dzień był słoneczny i rurociąg mógł do tej pory nie ulec jeszcze dostatecznemu wychłodzeniu, by w rurociągu ukształtował się stan ustalony. Aby sprawdzić ten efekt, wykonano obliczenia 2D nieustalonego pola temperatury wyłącznie w rurociągu, przyjmując jako warunki brzegowe pomiarowe rozkłady temperatury na wewnętrznej rurze i zewnętrznej powierzchni rurociągu.

Obliczenia obejmowały cały słoneczny dzień do godz. 23.00 i wykonano je dla danych zarejestrowanych w dniu 1.06.2009 r. Następnie wykonano dwuwymiarowe obliczenia pola temperatury w rurociągu i otoczeniu do godz. 0.55 następnego dnia, zakładając wyznaczony poprzednio rozkład temperatury w rurociągu jako warunek początkowy. W okresie tym występowały stabilne warunki pogodowe, temperatury w otoczeniu obniżyły się nieznacznie. Niektóre wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono na rys. 9. Temperatury zmierzone na powierzchni rurociągu o godz. 0.55 są nieco niższe od zmierzonych o godz. 23.00. Wynika to głównie z ochładzania się rurociągu w tym okresie, nagrzanego w ciągu poprzedniego dnia. Obliczeniowy rozkład temperatury wyznaczonego dla stanu ustalonego, a po 75 min różni się maksymalnie o 0,9 K. Równocześnie rozkłady te różnią się od rozkładu pomiarowego z godz. 0.55. Wszystko to oznacza, że przy stałych warunkach pogodowych w nocy pewne znaczenie ma początkowe wychładzanie rurociągu nagrzanego w ciągu dnia. Wydaje się, że symulacje wymiany ciepła pomiędzy rozpatrywanym rurociągiem a otoczeniem, przy założeniu stanu ustalonego przed północą bezchmurnego dnia, mogą prowadzić do istotnych błędów. Po

około 1,5÷2 h występowania stabilnych warunków w otoczeniu rurociąg jest już jednak schłodzony i założenie stanu ustalonego jest zasadne.



Rys. 9. Temperatury obliczeniowe (stan nieustalony i ustalony, 2D) na zewnętrznej powierzchni rurociągu stanowiska pomiarowego w funkcji kąta mierzonego od góry w kierunku przeciwnym do obrotu wskazówek zegara, pomiar 1/2.06.2009

W związku z powyższym powtórzono obliczenia prezentowane na rys. 8, ale dla warunków z godz. 1.00, 27.06.2009. Temperatury otoczenia były wówczas nieco niższe niż 1h i 35min wcześniej. Na rys. 10 przedstawiono wyniki pomiarów z godz. 23.25 (pom. 1) i z godz. 1.00 (pom. 3) oraz wyniki obliczeń 3D rozkładu temperatury na zewnętrznej powierzchni rozpatrywanego rurociągu dla stanu ustalonego. Warunki w ostatnich dwóch godzinach, mimo pewnego obniżenia temperatury nieboskłonu, były na tyle stabilne, że założenie stanu ustalonego wydaje się uzasadnione. Maksymalna rozbieżność pomiędzy temperaturą pomiarową i obliczoną w ten sposób jest mniejsza niż w przypadku obliczeń prezentowanych na rys. 8 dla godz. 23.25 i wynosi około 1,1 K, wobec około 2 K poprzednio. Jest więc wyraźnie mniejsza. Możliwa poprawa dokładności wymaga dalszego doskonalenia modelu transportu promieniowania. Stosowana metoda S2S nie pozwala bowiem uwzględnić bezpośrednio promieniowania gazów i kierunkowości promieniowania z przestrzeni kosmicznej. Dokładniej efekty te można byłoby uwzględnić przy zastosowaniu wielopasmowego modelu Discrete Ordinate (DO), który jest jednak bardzo czasochłonny.



Rys. 10. Temperatury eksperymentalne i obliczeniowe (stan ustalony, 3D, 26/27.06.2009, godz. 0.55 –pom. 3) na zewnętrznej powierzchni rurociągu stanowiska pomiarowego w funkcji kąta mierzonego od góry w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara

4. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wyniki symulacji transportu ciepła pomiędzy zaizolowanym cieplnie rurociągiem a jego otoczeniem (powietrze, ściany i dach budynku, nieboskłon) w warunkach niskiej temperatury nieboskłonu. Rurociąg ten stanowi podstawową część stanowiska do badania strat ciepła rurociągach ciepłowniczych. Symulacje wykonano za pomocą pakietu CFD ANSYS-FLUENT 12.1.4. Wyniki obliczeniowych rozkładów temperatury na płaszczu rurociągu porównano z wynikami pomiarów. Największe rozbieżności pomiędzy temperaturami obliczeniowymi i eksperymentalnymi dotyczą górnej powierzchni rurociągu, gdzie największe znaczenie ma radiacyjna wymiana ciepła pomiędzy tą powierzchnią a nieboskłonem. Dokładniejsze od dwuwymiarowych są wyniki obliczeń 3D. Obliczenia wykonywano dla stanu ustalonego. Analizowane testy wykazują, że w przypadku pogodnej nocy, przy słonecznej pogodzie w dniu poprzedzającym, założenie stanu ustalonego jest uzasadnione, ale nie wcześniej niż około północy, jeżeli poprzednio co najmniej w okresie 1,5 do 2 h panowały ustabilizowane warunki zewnętrzne.

LITERATURA

- 1. ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation.
- 2. Kostowski E.: Przepływ ciepła. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2000.
- 3. Kruczek T., Fic. A.: Numerical analysis of heat losses of overhead heat pipeline at low temperature of the sky. W: Materiały 13 Międzynarodowej Konferencji "Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, HTRSE-2010", Szczecin-Międzyzdroje, s. 299-308.
- 4. Kruczek T.: Determination of thermal parameters of experimental pipeline unit with the application of coordination procedure. In: Proceedings of the 1-st International Congress on Thermodynamics "Thermodynamics in Science and Technology". Poznań 2011, p. 88-95.

INFLUENCE OF RADIATION HEAT TRANSFER ON THE TEMPERATURE OF THE SHELL OF OVERHEAD HEAT PIPELINE FOR LOW TEMPERATURE OF THE SKY

<u>Summary</u>. The convective and radiative heat transfer take place between thermal pipelines and their surroundings. In the case of a low sky temperature, the radiation heat exchange is very intensive and the temperature of the top part of the horizontal pipeline can be significantly lower than the temperature of the bottom part. Sometimes this temperature is also lower than the temperature of the surrounding atmospheric air. Numerical analysis of the heat transfer in the system: pipeline – environment is the subject of the paper. CFD package ANSYS Fluent has been employed for this purpose. Both the convective and radiative heat transfer between the external surface of the pipeline and the environment have been taken into account. The numerical results have been compared with the results of the measurements performed with the use of experimental rig, especially designed and built for validation of the presented model of considered problem.

Praca zyskała wsparcie finansowe Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu Nr NN513 311735 realizowanego w ITC Pol. Śl. w latach 2008-2011.