

Exergy analysis and energy efficiency of measurement systems for compressible media based on the ISA nozzle

Analiza egzergii i efektywność energetyczna systemów pomiarowych dla mediów ściśliwych opartych na dyszy ISA



DOI: 10.15199/62.2024.12.18

Simulation studies on the detn. of the amt. of energy and exergy in a flowmeter based on the measurement of the pressure difference at a measuring nozzle installed in a steam pipeline were presented. The simulation was performed in the CFD OpenFOAM program using the $k-\omega$ -SST 2006 turbulence model. The amt. of total stream energy and exergy losses in the measuring section of the steam flow through the measuring element was detd. A decrease in energy qual. in mass flow measurement systems was demonstrated.

Keywords: energy analysis, flow measurement system, local entropy, exergy destruction, computational fluid dynamics, nozzle

W obliczu rosnących kosztów energii analiza egzergii staje się kluczowa dla zwiększenia efektywności energetycznej, szczególnie w sektorach przemysłowych wykorzystujących parę wodną. Badanie koncentruje się na ocenie strat egzergii w systemach nieustalonych i ściśliwych, przy zastosowaniu zaawansowanych technik symulacyjnych, takich jak OpenFOAM CFD. Wykorzystując twierdzenie o transporcie Reynoldsa, analiza zapewnia wgląd w straty jakości energii i efektywność pomiaru w systemach przemysłowych. Dokładność pomiaru wyznaczono wg normy, przez co wyniki oparte są na wiarygodnych wnioskach. Badanie podkreśla potrzebę zmiany założeń w projektowaniu i funkcjonowaniu systemów pomiaru strumienia masy dla mediów ściśliwych. Potrzeba ta wynika z możliwego do osiągnięcia zwiększenia jakości transportowanej energii, która to jakość jest mierzona jako wartość egzergii strumienia płynu.

Słowa kluczowe: analiza energetyczna, system pomiaru przepływu, entropia lokalna, destrukcja egzergii, obliczeniowa dynamika płynów, dysza

Przepływomierze oparte na pomiarze różnicy ciśnień są szeroko stosowane do pomiaru przepływu płynów w przemyśle. Inne warianty pomiaru ciśnienia na podstawie różnicy ciśnienia obejmują zastosowanie zwężek Venturiego lub dysz pomiarowych. Każde z tych urządzeń ma swoje zalety i ograniczenia, a osiągnięcie dokładnych pomiarów zależy od właściwej kalibracji. Są one w stanie mierzyć natężenia przepływu cieczy i gazów w szerokim zakresie ciśnień i temperatur^{1, 2}.



Dr hab. inż. Krzysztof J. WOŁOSZ, prof. PW (ORCID: 0000-0001-8208-9165), ukończył studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filia w Płocku. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelni w Zakładzie Aparatury Przemysłowej Instytutu Inżynierii Mechanicznej tej samej uczelni. Jest rzeczoznawcą SIMP w specjalności aparatura i urządzenia dla przemysłu chemicznego. Specjalność – obliczenia zjawisk przepływowych w ośrodkach ciągłych w zastosowaniach w przemyśle chemicznym.

* Adres do korespondencji:

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, ul. I. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, tel.: (24) 367-22-73, e-mail: krzysztof.wolosz@pw.edu.pl

Przedstawione badania dotyczą określenia ilości energii i egzergii w przepływomierzach opartych na dyszach pomiarowych typu ISA 1932. Celem jest ocena jakości i ilości energii zużywanej przez dyszę oraz zrozumienie zjawisk przepływu wewnątrz dyszy. Przegląd literatury wskazuje na brak kompleksowych badań nad analizą energetyczną w kontekście nieustalonych przepływów ściśliwych w dyszach pomiarowych. Modele analityczne i ustalone nie odzwierciedlają w pełni złożoności tych zjawisk. Badanie to wypełnia tę lukę, stosując zaawansowane metody numeryczne do analizy energii i egzergii, co jest kluczowe dla zrozumienia i optymalizacji wydajności przepływomierzy w zastosowaniach przemysłowych.

Część badawcza

Przedmiot badań

Badanie koncentrowało się na określeniu ilości energii przepływającej przez elementy pomiarowe oraz części energii, która pozostaje niewykorzystana (strata egzergii) ze względu na II zasadę termodynamiki. Wartości te są określane na podstawie parametrów strumienia przepływa-

jącego płynu przed i za elementem pomiarowym. W pracy elementem badanym była dysza pomiarowa typu ISA 1932³⁾. Głównym problemem badawczym była ocena jakości energii (poprzez wartość egzergii) i ilości energii traconej (strata egzergii) w trakcie pomiaru strumienia płynu płynącego przez dyszę. Na rys. 1 przedstawiono wizualizację przekroju dyszy pomiarowej ISA 1932, znajdującej zastosowanie w układach pomiarowych zakładów przemysłowych wykorzystujących parę wodną. Dysza ta jest zainstalowana w rurociągu pary wodnej o średnicy DN250. Badania przeprowadzono dla przepływu turbulentnego przy liczbie Reynoldsa $Re = 2,1 \cdot 10^6$, co odpowiada średniej prędkości w rurze 7 m/s i strumieniowi pary 12,3 kg/s. Symulację przeprowadzono w programie CFD OpenFOAM, wykorzystując model turbulencji $k-\omega$ -SST 2006. Na podstawie wyników symulacji określono ilość całkowitej energii strumienia i straty egzergii na odcinku pomiaru przepływu pary pod ciśnieniem 11 MPa i w temp. 500°C.



Fig. 1. Visualisation of the cross-section of the ISA 1932 measuring nozzle and the velocity vectors obtained during simulation

Rys. 1. Wizualizacja przekroju dyszy pomiarowej ISA 1932 oraz wektory prędkości uzyskane w trakcie symulacji

Model obliczeniowy

Jako metodę badawczą zastosowano obliczeniową dynamikę płynów CFD (*computational fluid dynamics*). Model geometryczny odzwierciedla rurę wewnętrzną z zainstalowaną dyszą ISA 1932. Długość odcinka przed dyszą to $3D$ (trzy średnice wewnętrzne), a odcinka za dyszą to $6D$. Zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji bez uproszczeń geometrycznych, ze względu na fakt występowania nieustalonego oraz nieosiowo symetrycznego przepływu przez dyszę. Wnioski takie wyciągnięto po przeprowadzeniu wstępnych symulacji numerycznych z zastosowaniem osiowo-symetrycznego modelu geometrycznego. Wyniki w ten sposób uzyskane drastycznie odbiegały od wartości normatywnych.

Model termodynamiczny płynu konstruowano w programie OpenFOAM⁴⁾ jako układ ciśnienie-temperatura, na podstawie którego obliczano inne właściwości. Przyjęto następujący model fizyczno-chemiczny pary wodnej: (i) gaz doskonały o gęstości ρ zależnej od ciśnienia p i temperatury

T : $\rho = p/(R \cdot T)$; (ii) lepkość μ określano na podstawie liczby Prandtla: $Pr = c_p \cdot \mu / \lambda$; (iii) stałe ciepło właściwe c_p i ciepło topnienia H_f . Na podstawie danych pary wodnej⁵⁾ przyjęto następujące stałe parametry fizyczno-chemiczne dla ciśnienia $p = 11$ MPa i temp. $T = 500^\circ\text{C}$: (i) ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu $c_p = 2640$ J/(kg·K); (ii) przewodność cieplna $\lambda = 0,077079$ W/(m·K); (iii) ciepło topnienia $H_f = 2,551$ MJ/kg i (iv) liczba Prandtla $Pr = 0,976572$.

W badaniu uwzględniono równania rządzące przepływem płynu, które obejmują bilans masy, pędu i energii. W bilansie masy suma strumieni wlotowego i wylotowego musi być równa zero dla danej komórki w obszarze obliczeniowym, pod warunkiem, że podczas ruchu nie jest tworzona ani niszczone żadna masa. W tym badaniu nie zachodzą reakcje chemiczne ani jądrowe, dlatego strumień masy netto wynosi zero zarówno dla wlotu, jak i wylotu. Bilans masy musi również uwzględniać zmianę gęstości w czasie oraz wpływ gęstości na strumień masy dla nieustalonego i ściśliwego charakteru przepływu. Bilans pędu – siły działają na element płynu w komórce obliczeniowej, prowadzą do powstawania naprężeń, które z kolei wywołują odkształcenia w elemencie. Określenie tych naprężeń i odkształceń jest możliwe dzięki zastosowaniu bilansu pędu. Równowaga ta obejmuje sumę sił dynamicznych i ciśnieniowych płynu, dostosowanych do reakcji ścian i grawitacji. Bilans energii musi być rozpatrywany w połączeniu z bilansami masy i pędu. W komórce obliczeniowej strumień energii wchodzący do komórki jest zwiększany przez strumień energii termicznej (cieplnej) i mechanicznej. Suma tych strumieni energii jest równa pozostałemu strumieniowi energii opuszczającemu komórkę. Uzupełniono układ równań o równanie przewodzenia ciepła, które wiąże strumień ciepła z gradientem temperatury.

Układ równań został rozwiązany numerycznie poprzez zastosowanie metody objętości skończonych. Równania zostały zdyskretyzowane w przestrzeni za pomocą liniowego schematu Gaussa z dokładnością drugiego rzędu. Biorąc pod uwagę nieustalony przepływ płynu, do dyskretyzacji czasowej zastosowano dokładny schemat Cranka i Nicolsona drugiego rzędu.

W celu prawidłowego obliczenia przepływu burzliwego wykorzystano konwencjonalny model Wilcoxa $k-\omega$ ⁶⁾, który jest dobrze zweryfikowany i odpowiedni dla analizy parametrów swobodnego przepływu. Modele turbulencji $k-\omega$ integrują dodatkowe równania opisujące energię kinetyczną turbulencji i jej rozpraszanie.

Poprawne rozwiązywanie równań bilansowych jest możliwe przy zastosowaniu odpowiednich warunków brzegowych. Dysze ISA 1932 są stosowane w warunkach przemysłowych, z których wynikają modelowane warunki brzegowe i początkowe. Wszystkie zastosowane warunki brzegowe można podzielić na trzy typy: (i) typu Dirichleta: $\varphi = const$, (ii) typu Neumanna: $\partial_n \varphi = 0$, i (iii) typu Robina: $\partial_n p_{out} + u_1 \partial_n p_{out} = u_1 / l_\infty (p_\infty - p_{out})$.

Warunki typu Dirichleta były zastosowane dla parametrów wlotowych, czyli ciśnienie $p = 11$ MPa, prędkość

$u = 7 \text{ m/s}$, temp. $T = 500^\circ\text{C}$, energia kinetyczna turbulencji $k = 0,206 \text{ J/kg}$ i szybkość rozpraszania energii $\omega = 46,7 \text{ 1/s}$.

Warunki typu Neumanna były zastosowane dla wszystkich parametrów wylotowych z wyjątkiem ciśnienia. Dla ciśnienia wylotowego zastosowano warunek brzegowy typu Robina⁷. Ciśnienie wylotowe p_{out} zostało obliczone przy założeniu jego wartości w oddaleniu p_∞ od wylotu z dyszy. Ciśnienie p_∞ znajdowało się w odległości $l_\infty = 5 \text{ m}$ od powierzchni wylotu, opisaney wektorem normalnym n , i było stałe oraz równe $p_\infty = 11 \text{ MPa}$.

Straty energii

Wyniki symulacji numerycznej są wykorzystywane do określenia energii i egzergii na wlocie i wylocie dyszy. Osłona bilansowa odpowiada warunkom brzegowym zastosowanym w analizie numerycznej. Do wyznaczenia strumienia energii wpływającej i wypływającej z dyszy wykorzystano twierdzenie transportu Reynoldsa w odniesieniu do I zasady termodynamiki⁸), które w pełnym zapisie przedstawiono równaniem (1).

$$\dot{E} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \left(e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) dV + \oint_A \rho \left(e + \frac{1}{2} u_i u_i \right) u_i n dA \quad (1)$$

Po uwzględnieniu średnich wartości członów źródłowych na wlocie do objętości V zamkniętej osłoną bilansową o powierzchni A otrzymuje się równanie (2):

$$\dot{E} = q_m \left(e + \frac{1}{2} \bar{u}^2 \right) \quad (2)$$

w którym \dot{E} oznacza strumień energii całkowitej, q_m strumień masowy pary wodnej, e energię wewnętrzną, zaś u średnią prędkość w przekroju poprzecznym kanału.

Strumień energii wchodzący do systemu i zmiany energii w objętości kontrolnej są równe ilości energii opuszczającej system. Zgodnie z prawem zachowania energii nie może ona być tworzona ani niszczone, ale może zmienić swoją formę. Osłona bilansowa jest ograniczona do wlotów i wylotów ze względu na nieprzepuszczalność ścian rury, w której zamontowana jest dysza. Wartości zostały uśrednione na podstawie średniej ważonej, przy czym wagami były obszary zajmowane przez poszczególne komórki siatki obliczeniowej.

Egzergia jest najwyższą energią, którą można przekształcić w pracę. W prowadzonym badaniu celem było określenie ilości egzergii utraconej w wyniku przepływu gazu przez dyszę. W układzie otwartym strumień egzergii przepływającej masy jest sumą egzergii niezwiązanej z przepływem i egzergii związanej ze zmianą parametrów roboczych gazu^{9, 10}). Przepływ powietrza przez dyszę nie wiąże się z reakcją chemiczną ani jądrową. Dysza jest przymocowana do ściany silosu, więc egzergia potencjalna i kinetyczna systemu jest niezmienna. Należy zatem wziąć pod uwagę tylko egzergię fizyczną, której strumień jest sumą strumieni egzergii zależnej od temperatury i ciśnienia, opisaną zależnością (3):

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \dot{X}_T + \dot{X}_p \\ \dot{X}_T &= q_m c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \\ \dot{X}_p &= q_m R T_0 \ln \frac{p}{p_0} \end{aligned} \quad (3)$$

Zatem po zsumowaniu otrzymuje się zależność (4):

$$\dot{X} = q_m c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + q_m R T_0 \ln \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

w której \dot{X} oznacza strumień egzergii całkowitej (fizycznej), R stałą gazową, zaś indeks 0 odnosi się do parametrów odniesienia.

Całkowitą egzergię fizyczną obliczano zgodnie z równaniem (4) dla sekcji wylotowej dyszy. Wielkości w równaniu były uśredniane w przestrzeni.

Wyniki symulacji

Wyniki badań ujawniają nieustalone właściwości przepływu w dyszy pomiarowej. Mimo stałych parametrów wlotowych, średnie wartości obserwowane na wylocie wykazywały zmienność, co jest kluczowe dla oceny energii i egzergii niesionej przez płynącą parę. Wszelakie uproszczenia modeli obliczeniowych w przestrzeni (np. model osiowo-symetryczny lub symetryczny) lub w czasie (model o stanie ustalonym) generują błędy obliczeniowe od kilku do ponad 50% wartości strumienia pary w porównaniu z wartościami uzyskanymi wg normy³). Zmienność przepływu na wylocie dyszy sugeruje potrzebę dalszych badań, zwłaszcza w kontekście analizy energetycznej. Zaobserwowana została cykliczność średniej energii wylotowej pary. Taka sama cykliczność występowała w strumieniu egzergii, ale była przesunięta w fazie. Wynikało to z faktu, że egzergia składa się z dwóch komponentów, zależnego od temperatury i zależnego od ciśnienia. Komponent związany z przekazywaniem ciepła jest obciążony większą bezwładnością, co powoduje to przesunięcie w czasie.

Wyniki badań przedstawiono na rys. 2. Po początkowym bardzo zmiennym okresie następował przepływ pulsacyjny

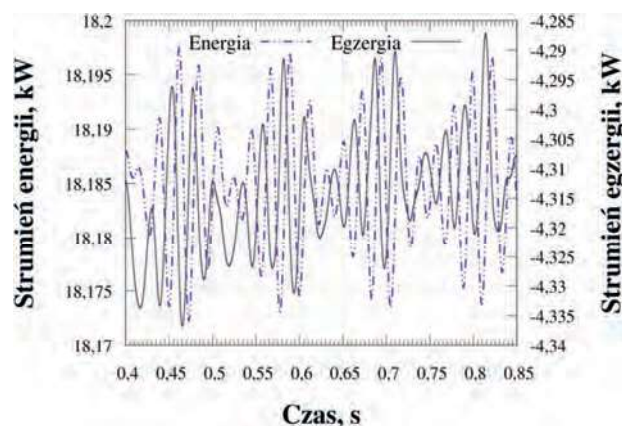


Fig. 2. Comparative plot showing mean energy and exergy rates during simulation time

Rys. 2. Wykres porównawczy pokazujący średnie strumienie energii i egzergii w czasie symulacji

ny, a wartość maksymalnej amplitudy wartości strumienia energii wynosiła 35 W. Jednocześnie występował zmienny strumień egzergii o maksymalnej amplitudzie 70 W. Średnia wartość bezwzględna strumienia egzergii wynosiła 13% wartości strumienia energii. Pulsacje wprowadzały w ten strumień dodatkowe straty, a oznacza to, że koszt energetyczny przepływu pulsacyjnego jest dwukrotnie wyższy niż jego brak. Interesującym faktem jest przesunięcie w fazie pulsacji strumienia energii i egzergii. Zmiany te były prawdopodobnie spowodowane bezwładnością w przenoszeniu energii cieplnej przez przewodzenie w parze wodnej. To opóźnienie czasowe wpływało na strumień egzergii związany z temperaturą w znacznie większym stopniu niż na strumień energii.

Egzergia, zazwyczaj dodatnia, w badanym przypadku osiągała ujemne wartości z uwagi na przyjęte wartości temperatury T_0 i ciśnienia p_0 odniesienia. Ponieważ badania dotyczyły samej dyszy, przyjęto średnie wartości pracy panujące w rurociągu, w którym zamontowana była dysza. Średnie wartości strumienia egzergii były ok. 13% niższe w stosunku do średnich wartości energii. Oznacza to spadek jakości energii przenoszonej przez parę.

Podsumowanie

Z analizy przeprowadzonych badań wynika, że strumień za dyszą nie jest stacjonarny. Wpływa to również na strumienie energii i egzergii. Wyniki symulacji wskazują na obecność pulsacji w strumieniu energii i egzergii przepływającej pary wodnej. Zjawisko to prowadzi do dodatkowych strat egzergii, co zwiększa koszty energetyczne. Wykazano również ograniczenia w stosowaniu stacjonarnych modeli numerycznych dla rozważanego przypadku, z powodu generowania istotnych błędów obliczeniowych.

Przedstawione badanie (przeprowadzone za pomocą metody objętości skończonej zawartej w pakiecie

OpenFOAM) koncentruje się na analizie egzergii i efektywności energetycznej systemów pomiarowych opartych na dyszach ISA 1932, szczególnie w kontekście przepływów ściśliwych i niustalonych. Wyznaczono straty egzergii, a przez to spadek jakości energii w systemach do pomiarów strumienia masy. Zastosowane modele obliczeniowe uwzględniają warunki brzegowe typu Dirichleta, Neumanna i Robina, co pozwala na dokładne odwzorowanie zjawisk przepływu wewnątrz dyszy w warunkach przemysłowych.

Podsumowując, szczegółowa analiza numeryczna przepływu przez dyszę pomiarową ISA pozwala na uzyskanie znacznie większej ilości danych niż pomiary eksperymentalne. Badania eksperymentalne będą jednak niezbędne do weryfikacji wyników symulacji. Weryfikacja ta jest przewidziana w najbliższej przyszłości i będzie oparta na pomiarze różnicy ciśnień w dyszy.

Otrzymano: 08-10-2024

Zrecenzowano: 16-11-2024

Zaakceptowano: 25-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] R. Thorn, [w:] *Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement* (red. J.G. Webster, H. Eren), CRC Press, Boca Raton 2017.
- [2] A. Golijanek-Jędrzejczyk, A. Mrowiec, S. Kleszcz, R. Hanus, M. Zych, M. Jaszczur, *Measurement* 2022, **193**, 110910, doi: 10.1016/j.measurement.2022.110910.
- [3] PN-EN ISO 5167-3:2023, *Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Cz. 3. Dysze i dysze Venturiego*.
- [4] Ch. Greenshields, *OpenFOAM v11 User Guide*, The OpenFOAM Foundation, London, UK, 2023.
- [5] W. Wagner, A. Pruß, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 2002, **31**, nr 2, 387.
- [6] D.C. Wilcox, *AIAA J.* 2008, **46**, nr 11, 2823.
- [7] S.V. Utyuzhnikov, *Appl. Numer. Math.* 2008, **58**, nr 10, 1521.
- [8] A. Szumowski, W. Selerowicz, J. Piechna, *Dynamika gazów*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1988.
- [9] V.A.F. Costa, *Energy* 2016, **116**, 824.
- [10] J. Szargut, A. Ziębiak, *Podstawy energetyki cieplnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.



Studia podyplomowe

„Wyroby lakierowe. Technologia i zastosowanie”

Dwusemestralne studia podyplomowe prowadzone są na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. Kolejna, 7. sesja rozpoczyna się **8 marca 2025 r.** Termin zgłaszania **31.01.2025 r.**

Zajęcia odbywają się w Politechnice Krakowskiej, w Łukasiewicz – Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Gliwicach oraz w 2 fabrykach. Egzamin końcowy odbędzie się w grudniu 2025 r.

Studia Podyplomowe przekazują kompletną, praktyczną i przydatną wiedzę z zakresu najnowszych technologii i stosowania wszystkich rodzajów farb i lakierów. W trakcie studiów prowadzone są wykłady, a także zajęcia praktyczne w laboratoriach oraz w przemyśle. Wykładowcami są naukowcy, specjaliści z krajowych i zagranicznych instytutów badawczych oraz praktycy z przemysłu.

Bliższe informacje wraz z kartą zgłoszenia na studia dostępne są na stronie:

<https://studiafarby.pk.edu.pl>