

Joanna BAKALARZ, Jan THULLIE, Łukasz KUROWSKI, Tomasz WIŚNIEWSKI, Michał PALICA

e-mail: jan.thullie@polsl.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Charakterystyka przewodnictwa cieplnego nanopłynów zawierających cząstki Al_2O_3

Wstęp

Nanopłyny to zawiesiny bardzo drobnych cząstek ciała stałego (rzędu 10–100 nm) w cieczy bazowej [1], która na ogół jest wodą, glikol etylenowy lub olej. Są to cieczce ymiany ciepła. Cząstki ciała stałego, zwane nanocząstkami, ze względu na wielkość są metalami, tlenkami metali lub innymi związkami chemicznymi poprawiającymi własności cieplne nanopłynu względem cieczy bazowej. Okazało się bowiem, że bardzo mały dodatek nanocząstek (rzędu 1–2% objętościowo) może znacznie poprawić wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła nanopłynu, a także wyraźnie podwyższyć współczynnik wnikania ciepła, prawie nie wpływając na zwiększenie oporów przepływu. Mechanizm tego procesu nie jest jeszcze w pełni wyjaśniony [1, 2].

Formuła określająca efektywny współczynnik przewodnictwa ciepła nanopłynów

Ze względu na bardzo duże potencjalne zastosowanie nanopłynów istnieje zapotrzebowanie na numeryczne symulowanie ich przepływu w aparatach do wymiany ciepła, a tym samym konieczne jest określenie wzorów opisujących efektywny współczynnik przewodzenia ciepła w nanopłynie.

Istnieje wiele prac poświęconych temu zagadnieniu, które omówiono w opracowaniach przeglądowych, m.in. w [1, 2]. Stwierdzono duży rozróżnienie uzyskanych wyników eksperymentalnych, a proponowane teorie są zbyt skomplikowane dla bezpośredniego wykorzystania w obliczeniach numerycznych. Z tych względów część autorów [3, 4] stosuje proste zależności funkcyjne z parametrami estymowanymi na drodze eksperymentalnej.

W przypadku układu Al_2O_3 /woda zaproponowana przez Li oraz Petersona [5, 6] funkcja liniowa została w pracy [7] zastąpiona zależnością o następującej postaci:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f} = \frac{\phi}{A + B\phi + \frac{C}{t} + \frac{D\phi}{t}} \quad (1)$$

gdzie

λ_f – współczynnik przewodzenia ciepła cieczy bazowej, [W/mK],
 $\Delta\lambda$ – wzrost współczynnika przewodzenia ciepła po dodaniu nanopłynu, [W/mK],
 ϕ – udział objętościowy nanocząstek,
 t – temperatura, [°C],
 A, B, C, D – stałe doświadczalne.

Postać ta wykazuje lepsze odzwierciedlenie wyników eksperymentalnych i umożliwia łatwe porównanie z danymi innych prac.

W przypadku stałej temperatury wzór (1) redukuje się do zależności:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f} = \frac{\phi}{a + b\phi} \quad (2)$$

gdzie

$$a = A + \frac{C}{t} \quad b = B + \frac{D}{t}$$

przy czym postać ta wynika z klasycznego wzoru, zaś stałe z eksperymentów.

Jak zauważono w pracy [7], wzór (1) daje możliwość ekstrapolacji do wartości $\phi = 0$ (gdzie $\Delta\lambda = 0$), czego nie zapewniały wzory propo-

nowane przez Li i Petersona [5, 6]. Jednakże dla dużych wartości ϕ może zachodzić przypadek, gdy $ab < 0$. Wówczas dla określonej wartości $\phi = -a/b$ wartość efektywnego współczynnika przewodnictwa cieplnego dąży do nieskończoności, co z fizycznego punktu widzenia nie jest możliwe.

W związku z powyższym proponowana jest następująca modyfikacja wzoru (1):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f} = \frac{\phi}{a + b\phi} + \frac{(\lambda_p - \lambda_f)\phi}{\lambda_f} - \frac{\phi^2}{a + b\phi} \quad (3)$$

gdzie

λ_p – współczynnik przewodzenia ciepła nanocząstek, [W/mK].
 Wzór ten zachowuje wartość asymptotyczną λ_p dla przypadku $\phi \rightarrow 0$.
 Wartości λ_p zostały zmierzone dla nanocząstek Al_2O_3 [8] i zamieszczone je w tab. 1.

Tab. 1. Wartości przewodnictwa cieplnego nanocząstek o różnych rozmiarach [8]

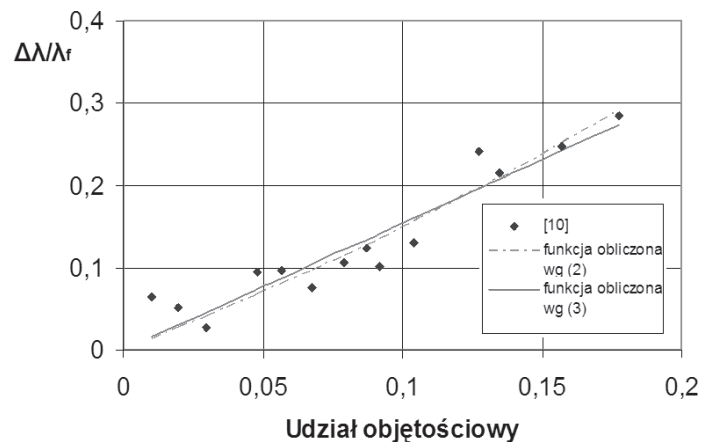
| Wielkość nanocząstki [nm] | λ_p [W/mK] |
|---------------------------|--------------------|
| 11 | 0,682 |
| 20 | 0,431 |
| 40 | 0,330 |

W przypadku małych wartości ϕ estymacji wartości stałych można dokonać dla wzoru:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f} - \frac{(\lambda_p - \lambda_f)\phi}{\lambda_f} = \frac{\phi}{a + b\phi} \quad (4)$$

Tak przeprowadzona estymacja prowadzi do uzyskania dodatnich wartości stałych a i b , a tym samym zapewnia przebieg krzywej $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f} = f(\phi)$ zgodny z fizyką zjawiska.

Warto dodać, że położenie krzywej aproksymującej wyniki eksperymentalne w zakresie przeprowadzonych badań jest zbliżone (Rys. 1).

Rys. 1. Efektywne przewodnictwo cieplne nanopłynu Al_2O_3 /woda o rozmiarze nanocząstek 36 [nm] w temperaturze 21–23°C

W tab. 2 przedstawiono wyniki estymacji stałych równania (1) dla szeregu przypadków na podstawie prac eksperymentalnych [10, 12–16], których nie przeanalizowano w pracy [7]. Na ich podstawie sporządzono tab. 3 i 4 porównujące stałe a i b we wzorze (2) dla wybranych temperatur.

Tab. 2. Zestawienie wartości stałych *A*, *B*, *C* i *D* w równaniu (1) dla nanocząstek Al₂O₃ wzwieszonych w wodzie i glikolu etylenowym

| Rodzaj nanopłyynu | Rozmiar nanocząstek [nm] | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>R</i> ² |
|---|--------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 11 | 0,05 | 0,06 | 1,19 | 33,00 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [13] | 20 | 0,33 | 2,43 | 0,26 | 0,34 | 0,990 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 36 | -0,43 | 13,84 | 16,22 | -250,89 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [14] | 38 | 0,26 | -2,28 | -3,22 | 160,63 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [15] | 38 | -0,06 | 0,79 | 6,48 | 80,17 | 0,998 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 47 | 0,27 | 8,97 | -4,70 | -15,07 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 47 | -0,02 | 0,40 | 7,94 | 72,41 | 0,991 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 150 | -0,14 | -0,12 | 19,56 | 70,08 | 0,994 |
| Al ₂ O ₃ /EG [16] | 80 | 0,15 | -11,02 | -1,20 | 356,55 | 0,997 |

Tab. 3 Zestawienie wartości stałych *a* i *b* w równaniu (2) dla nanocząstek Al₂O₃ wzwieszonych w wodzie i glikolu etylenowym w temperaturze 23°C

| Rodzaj nanopłyynu | Rozmiar nanocząstek [nm] | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>R</i> ² |
|---|--------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 11 | 0,09 | 1,49 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [8] | 11 | 0,35 | 2,23 | 0,997 |
| Al ₂ O ₃ /woda [8] | 20 | 0,31 | 3,87 | 0,999 |
| Al ₂ O ₃ /woda [13] | 20 | 0,34 | 2,44 | 0,990 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 36 | 0,27 | 2,93 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [14] | 38 | 0,12 | 4,70 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [15] | 38 | 0,21 | 4,28 | 0,998 |
| Al ₂ O ₃ /woda [8] | 40 | 0,26 | 1,59 | 0,989 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 47 | 0,06 | 8,31 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 47 | 0,32 | 3,55 | 0,991 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 150 | 0,71 | 2,93 | 0,994 |
| Al ₂ O ₃ /EG [8] | 11 | 0,41 | 5·10 ⁻⁵ | 0,953 |
| *Al ₂ O ₃ /EG [8] | 20 | 0,38 | 1·10 ⁻⁵ | 0,939 |
| *Al ₂ O ₃ /EG [8] | 40 | 0,44 | 1,35·10 ⁻⁵ | 0,921 |
| Al ₂ O ₃ /EG [16] | 80 | 0,09 | 4,48 | 0,997 |

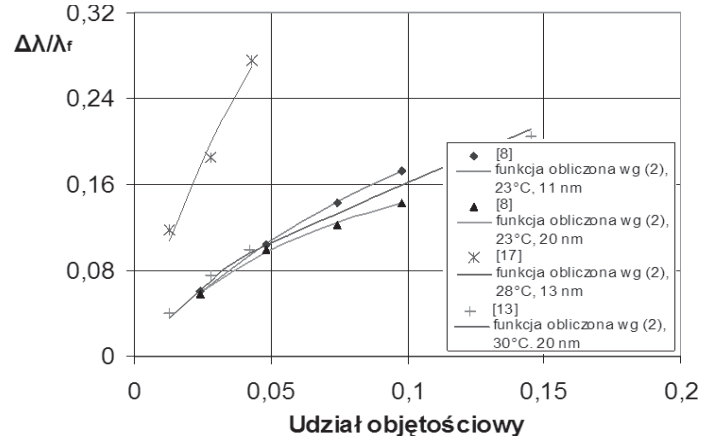
* oznacza, że wartości stałych *a* i *b* zostały obliczone metodą najmniejszych kwadratów poprzez estymację wyrażenia (4).

Tab. 4 Zestawienie wartości stałych *a* i *b* w równaniu (2) dla nanocząstek Al₂O₃ wzwieszonych w wodzie i glikolu etylenowym w temperaturze 28°C

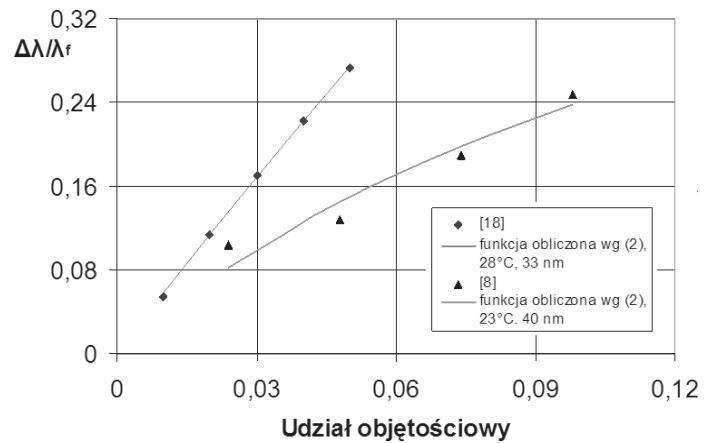
| Rodzaj nanopłyynu | Rozmiar nanocząstek, [nm] | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>R</i> ² |
|---|---------------------------|----------|------------------------|-----------------------|
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 11 | 0,09 | 1,24 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [17] | 13 | 0,11 | 1,47 | 0,980 |
| Al ₂ O ₃ /woda [13] | 20 | 0,33 | 2,44 | 0,990 |
| Al ₂ O ₃ /woda [18] | 33 | 0,17 | 0,23 | 0,998 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 36 | 0,15 | 4,88 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [14] | 38 | 0,15 | 3,46 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [15] | 38 | 0,17 | 3,66 | 0,998 |
| Al ₂ O ₃ /woda [11] | 38,4 | 0,26 | 8,22 | 0,998 |
| Al ₂ O ₃ /woda [10] | 47 | 0,09 | 8,43 | 1,000 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 47 | 0,26 | 2,99 | 0,991 |
| *Al ₂ O ₃ /woda [9] | 60,4 | 0,21 | 0,001 | 0,990 |
| Al ₂ O ₃ /woda [12] | 150 | 0,56 | 2,38 | 0,994 |
| Al ₂ O ₃ /EG [22] | 15 | 0,31 | 5·10 ⁻⁵ | 0,997 |
| Al ₂ O ₃ /EG [23] | 15 | 0,28 | 5,003·10 ⁻⁴ | 0,980 |
| Al ₂ O ₃ /EG [22] | 26 | 0,31 | 5·10 ⁻⁵ | 0,996 |
| Al ₂ O ₃ /EG [23] | 26 | 0,28 | 1,001·10 ⁻³ | 0,981 |
| Al ₂ O ₃ /EG [22] | 38,4 | 0,31 | 5·10 ⁻⁵ | 0,995 |
| Al ₂ O ₃ /EG [24] | 38,4 | 0,28 | 5·10 ⁻⁵ | 0,980 |
| *Al ₂ O ₃ /EG [11] | 38,4 | 0,32 | 1,001·10 ⁻³ | 0,992 |

* oznacza, że wartości stałych *a* i *b* zostały obliczone metodą najmniejszych kwadratów poprzez estymację wyrażenia (4).

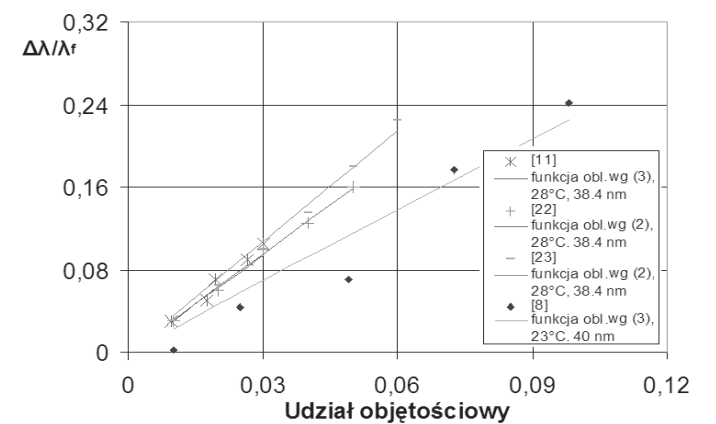
Położenie punktów eksperymentalnych oraz krzywych je aproksymujących przedstawiono na rys. 2÷4. Wszystkie wykresy wykazują bardzo dobrą zgodność eksperymentów z aproksymującymi je krzywymi. Krzywe określone są przez parametry przedstawione w tab. 2 oraz w tab. 3 i 4. Wydaje się, że przedstawiony materiał w pełni upoważnia do stosowania wzoru (1) w obliczeniach numerycznych.



Rys. 2. Efektywne przewodnictwo cieplne nanopłynów Al₂O₃/woda o rozmiarach nanocząstek 11, 13 i 20 [nm] w zmiennych warunkach temperatury



Rys. 3. Efektywne przewodnictwo cieplne nanopłynów Al₂O₃/woda o rozmiarach nanocząstek 33 i 40 [nm] w zmiennych warunkach temperatury



Rys. 4. Efektywne przewodnictwo cieplne nanopłynów Al₂O₃/EG o rozmiarach nanocząstek 38,4 i 40 [nm] w zmiennych warunkach temperatury

Na podstawie danych zebranych w tab. 3 i 4 można stwierdzić, że ze wzrostem temperatury wartości stałej *a* maleją; jedynie w dwóch przypadkach zaobserwowano odmienną tendencję [10, 14]. Stałe te zawarte są w przedziale 0÷0,7; przy czym graniczna wartość 0,7 dotyczy naj-

większych badanych nanocząstek 150 nm (a zatem leżących właściwie poza zakresem zainteresowania).

Stała b wykazuje znacznie większy przedział zmienności i niestety nie można określić jednoznacznie wpływu temperatury na jej wartość, gdyż czasami b wzrasta ze wzrostem temperatury, a czasami maleje.

Znacznie wyraźniej, pomimo istniejącego rozrzutu wyników obliczeń, przedstawia się sprawa wpływu wielkości nanocząstki na efektywne przewodnictwo cieplne nanopłynów. Zarówno stała a , jak też b (mniej wyraźnie), wzrasta ze zwiększeniem wielkości nanocząstki; w efekcie prowadzi to do zmniejszenia wartości efektywnego współczynnika przewodnictwa cieplnego nanopłynów, co znajduje potwierdzenie eksperymentalne.

Należy zaznaczyć, że takie zachowanie stałych a oraz b dotyczy nanopłynów Al_2O_3 /woda. W przypadku nanopłynów Al_2O_3 /glikol etylenowy stała b w większości przypadków jest bardzo mała, co sugeruje możliwość uproszczenia proponowanych wzorów. Do tego celu potrzebna jest jednak szersza baza eksperymentalna.

Istotne jest również, że w tym przypadku nie obserwuje się wpływu wielkości nanocząstek na wielkość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła.

Ostatnio ukazała się praca Zhu i wsp. [24], w której przedstawiono wpływ parametru pH na efektywny współczynnik przewodnictwa cieplnego nanopłynów. Autorzy ci stwierdzili maksimum λ dla wartości $pH = 7,2 \div 8,5$, przy czym jest ono tym wyższe, im większy jest udział objętościowy nanocząstek. W dotychczas opublikowanych pracach nie uwzględniono tego parametru, co może tłumaczyć duży rozrzut wyników eksperymentalnych.

Podsumowanie

Układ Al_2O_3 /woda jest najlepiej przebadanym nanopłynem, nie mniej jednak zaprezentowane w różnych pracach wyniki eksperymentalne nie są łatwe do opisanego jedną ogólną zależnością. Wydaje się, że w obliczeniach numerycznych dla tego nanopłynów można posługiwać się wzorem (1) z parametrami zestawionymi w tab. 2.

W stosunku do rezultatów pracy [7] znacznie poszerzono bazę eksperymentalną, dla której przeprowadzono obliczenia, uzyskując za każdym razem bardzo dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z pro-

ponowaną formułą, przy czym zdaniem autorów niniejszej pracy wzór ten obowiązuje w przebadanym zakresie temperatury $t \cong 20 \div 80^\circ C$ i brak jest dotąd danych, by można go ekstrapolować.

LITERATURA

- [1] V. Trisaksri, S. Wongwises: Renew. Sust. Energ. Rev., 11, 512 (2007).
- [2] S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Yu, T. Pradeep: Nanofluids: Science and Technology, Wiley, N.Y. 2007.
- [3] S. E. B. Maiga, S. J. Palm: Int. J. Heat Fluid Fl., 26, 530 (2005).
- [4] S. J. Palm, G. Roy, C. T. Nguyen: Appl. Therm. Eng., 26, 2209 (2006).
- [5] C. H. Li, G. P. Peterson: J. Appl. Phys., 99, 084314 (2006).
- [6] C. H. Li, G. P. Peterson: J. Appl. Phys., 101, 044312 (2007).
- [7] J. Thullie, Ł. Kurowski, K. Chmiel-Kurowska: Inż. Ap. Chem. 47, nr 1, 13 (2008).
- [8] E. U. Timofeeva, A. N. Gavrilov, J. M. McCloskey, Y. V. Tolmachev: Phys. Rev. E, 76, 061203 (2007).
- [9] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu: J. Appl. Phys., 91, nr 7, 4568 (2002).
- [10] H. A. Mintsa, G. Roy, C. T. Nguyen, D. Doucet: Int. J. Therm. Sci., 48, 363-371 (2009).
- [11] V. Velagapudi, R. K. Konijeti, Ch. S. K. Aduru: Thermal Science, 12, 27 (2008).
- [12] Ch. H. Chon, K. D. Kihm: Appl. Phys. Lett., 87, 153107 (2005).
- [13] X. Zhang: J. Appl. Phys., 100, 044325 (2006).
- [14] S. J. Palm, G. Roy, C. T. Nguyen: Appl. Therm. Eng., 26, 2209 (2006).
- [15] S. K. Das, N. Putra, W. Roetzel: Int. J. Heat Mass Tran., 46, 851 (2003).
- [16] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, C. Yang: Int. J. Therm. Sci., 47, 560 (2008).
- [17] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma: Netsu Bussei, 4, 227 (1993).
- [18] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson: Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II, 457, Materials Research Society, USA, 3-11, 1997.
- [19] D. Wen, Y. Ding: Int. J. Heat Mass Tran., 47, 5181 (2004).
- [20] D. H. Yoo, K. S. Hong, H-S. Yang: Thermochemical Acta, 455, 66 (2007).
- [21] D. H. Yoo, K. S. Hong, T.E. Hong, J. A. Eastman, H-S. Yang: J. Korean Phys. Soc., 51, S84 (2007).
- [22] Y. Feng, B. Yu, K. Feng, P. Xu, M. Zou: J. Nanopart. Res., 10, 1319 (2008).
- [23] S. Lee, S. Choi, S. Li, J. Eastman: J. Heat Transfer, 121, 280 (1999).
- [24] D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li: Current Appl. Phys., 9, 131 (2009).

CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

ukazuje się od 1961 roku

Czasopismo jest poświęcone problemom obliczeń procesowych i zagadnieniom projektowo-konstrukcyjnym aparatury i urządzeń stosowanych w przemysłach przetwórczych, w tym szczególnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, rolno-spożywczym, jak również w energetyce, gospodarce komunalnej i w ochronie środowiska.

Przeznaczone jest zarówno dla pracowników badawczych, projektantów, konstruktorów, jak i dla menadżerów oraz inżynierów ruchomych.

W czasopiśmie publikowane są artykuły o szerokim spektrum tematycznym, obejmującym problematykę procesów i operacji jednostkowych inżynierii chemicznej, bio- i nanotechnologie, inżynierię biomedycyną, recykling, bezpieczeństwo procesowe oraz obliczenia i projektowanie aparatów w aspekcie poprawy wydajności, lepszego wykorzystania surowców, oszczędności energii i ochrony środowiska.

Publikowane prace są recenzowane przez specjalistów. Autorzy artykułów opublikowanych w „Inżynierii i Aparaturze Chemicznej” uzyskują 6 punktów efektywności publikacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Czasopismo jest regularnie aktualizowane w CAS (Chemical Abstracts Service – a division of the American Chemical Society, Columbus, Ohio, USA) i jest indeksowane na platformie SciFinder®:

<http://www.cas.org/products/scifindr/index.html>

oraz w Bazie Polskich Czasopism Technicznych – BazTech:

<http://baztech.icm.edu.pl/wysz.html>