

## Wyznaczanie współczynnika przenikania ciepła lutni elastycznych

dr inż. Marek Jedziniak  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

### Streszczenie:

Przedstawiono budowę stanowiska badawczego oraz metodykę z procedurą obliczeniową do wyznaczania współczynników wnikania, przewodzenia i przenikania ciepła przez lutnie elastyczne. Omówiono charakterystykę procesu wymiany ciepła przez przenikanie od czynnika grzewczego płynącego w cylindrycznym przewodzie do otoczenia.

### Abstract:

Design of test bench as well as methodology with calculation procedure for determination of convection and overall heat transfer coefficient as well as thermal conductivity for flexible ventubes is presented. Heat transfer process by convection from heating medium in a cylindrical duct to the surrounding environment is discussed.

Słowa kluczowe: lutnia elastyczna, współczynnik przenikania ciepła, współczynnik przewodzenia ciepła, współczynnik wnikania ciepła, stanowisko pomiarowe

Keywords: flexible ventube, overall heat transfer coefficient, thermal conductivity, convection heat transfer coefficient, test bench

## 1. Wstęp

Lutnie elastyczne i metalowe są powszechnie stosowane do transportu powietrza, przede wszystkim w podziemiach kopalń. Do zalet lutni elastycznych w stosunku do lutni metalowych, zalicza się przede wszystkim:

- możliwość dowolnego kształtowania (szybkiej i łatwej zmiany) trasy lutniociągu,
- niższą masę,
- możliwość zgromadzenia lutni w postaci zwiniętej i jej rozwijania, wraz z postępowaniem przodka.

Zaletą lutni elastycznych jest również możliwość stosowania różnego rodzaju materiałów, dzięki czemu mogą być stosowane:

- lutnie o różnych barwach bądź przezroczyste,
- lutnie o różnej odporności na temperaturę,
- lutnie o różnej odporności na czynniki chemiczne,
- lutnie przystosowane do transportu materiałów żywnościowych (np. transport pneumatyczny zboża).

Wadami lutni elastycznych są natomiast:

- niższa trwałość, z uwagi na łatwość przerwania materiału, z którego lutnia jest wykonana,
- niższa odporność na podciśnienie – lutnie pracujące na podciśnieniu powinny być uzbrojone drutem stalowym (mogą zapaść się pod wpływem podciśnienia),
- niebezpieczeństwo zerwania lutni w przypadku gwałtownego podmuchu powietrza, (np. podczas rozruchu wentylatora lutniowego).

W przypadku transportu gazów o temperaturze znacząco wyższej lub niższej od otoczenia, istnieje możliwość wykonania lutni izolacyjnych z materiału charakteryzującego się niskim współczynnikiem przenikania ciepła. Parametr ten, opisujący izolacyjność lutni, wymaga doświadczalnego wyznaczenia na drodze badania przepływu ciepła przez ściankę lutni.

Jest to szczególnie istotne w przypadku stosowania elastycznych lutni izolacyjnych w wyrobiskach kopalń, w których stosowana jest klimatyzacja. Stosowane obecnie materiały w przewodach lutniowych powodują przenikanie strumienia ciepła od otoczenia do strumienia zimnego powietrza wewnątrz przewodu lutniowego, przez co zmniejsza się efektywność układu klimatyzacyjnego. Objawia się to silnym oszronieniem lutniociągu na odcinku kilku, czasem kilkunastu metrów za parownikiem układu klimatyzacyjnego. Straty te obniżają efektywność stosowanych układów chłodniczych, stąd istnieje konieczność stosowania lutni o izolacyjnych własnościach termicznych.

## 2. Wymiana ciepła podczas przepływu czynnika grzewczego przez przewód rurowy

Podczas przepływu czynnika grzewczego przez przewód rurowy następuje przenikanie ciepła  $Q_{str}$  przez ścianki przewodu do otoczenia, w wyniku czego temperatura czynnika grzewczego płynącego w przewodzie obniża się (zakłada się, że jego temperatura jest wyraźnie wyższa od temperatury otoczenia).

Przenikanie ciepła od rdzenia czynnika płynącego w przewodzie do otoczenia jest sumą procesów cząstkowych:

- wnikania ciepła od czynnika gazowego do ścianki przewodu,
- przewodzenia ciepła przez ściankę przewodu,
- wnikania ciepła od ścianki przewodu do otoczenia,
- promieniowanie ciepła od zewnętrznej powierzchni ścianki do otoczenia.

Proces wnikania ciepła opisano współczynnikiem wnikania ciepła  $\alpha$ , zdefiniowanym równaniem Newtona:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (1)$$

gdzie:

Q	[J]	ciepło wymieniane na drodze wnikania,
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	współczynnik wnikania ciepła,
F	[m <sup>2</sup> ]	powierzchnia wymiany ciepła,
$\Delta t$	[K]	różnica temperatur,
$\tau$	[s]	czas,

przy czym  $\Delta t$  jest różnicą temperatur między czynnikiem a powierzchnią ścianki (w rozpatrywanym przypadku są to wielkości  $\Delta t_{0-1}$  lub  $\Delta t_{2-3}$  – rysunek 1).

Współczynnik wnikania ciepła określa wielkość energii cieplnej, która wnika w ciągu jednostki czasu od lub do czynnika, do lub od jednostki powierzchni ścianki przy różnicy temperatury między czynnikiem a ścianką równej jedności.

Proces przewodzenia ciepła opisano współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda$ , zdefiniowanym równaniem Fouriera:

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (2)$$

gdzie:

Q	[J]	ciepło wymieniane na drodze przewodzenia,
$\lambda$	[W/mK]	współczynnik przewodzenia ciepła,
s	[m]	grubość ścianki,
F	[m <sup>2</sup> ]	powierzchnia wymiany ciepła,
$\Delta t$	[K]	różnica temperatur,
$\tau$	[s]	czas,

przy czym  $\Delta t$  jest różnicą temperatur na powierzchniach ścianki (w rozpatrywanym przypadku jest to wielkość  $\Delta t_{2-3}$ ).

Współczynnik przewodzenia ciepła określa wielkość energii, która przepływa przez jednostkę przekroju w jednostce czasu przy spadku temperatury równym jedności, na drodze jednostki grubości warstwy (ścianki).

Promieniowanie jest procesem, którego udział przy transporcie ciepła w zakresie rozpatrywanych temperatur jest znikomo mały i może być pominięte.

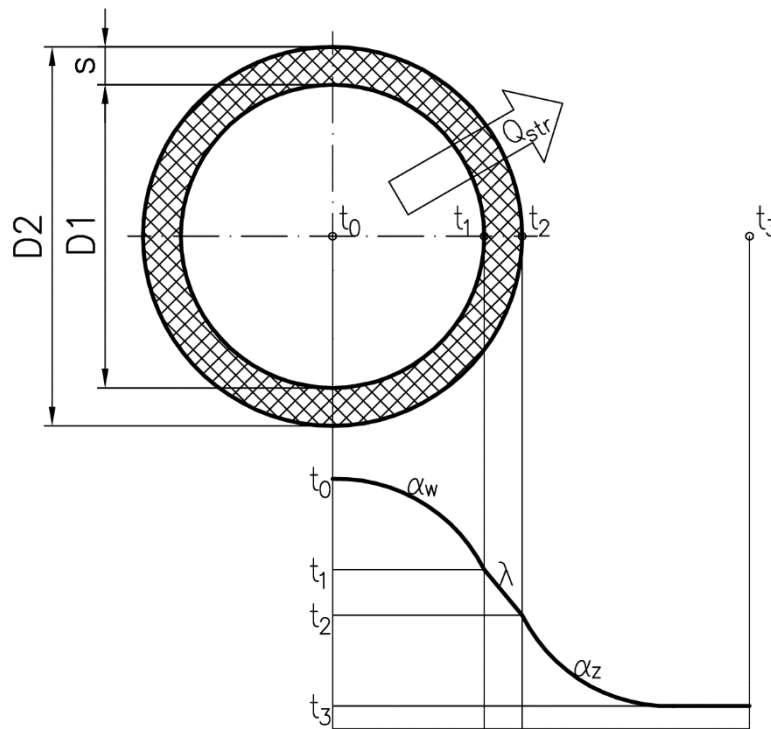
Sumaryczny proces przenikania ciepła, przedstawiony schematycznie na rysunku 1, opisuje współczynnik przenikania ciepła określony równaniem:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (3)$$

gdzie:

Q	[J]	ciepło wymieniane na drodze przenikania,
k	[W/m <sup>2</sup> K]	współczynnik przenikania ciepła,
F	[m <sup>2</sup> ]	powierzchnia wymiany ciepła,
$\Delta t$	[K]	różnica temperatur,
$\tau$	[s]	czas,

przy czym  $\Delta t$  jest różnicą temperatur na całej drodze procesu (w rozpatrywanym przypadku jest to wielkość  $\Delta t_{0-3}$ ).



Rys. 1. Schemat procesu przenikania ciepła [1]

Współczynnik przenikania można więc zdefiniować następująco:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_z} \quad (4)$$

Równania (1), (2) i (3) można odnieść do jednostki czasu, otrzymując odpowiednio:

– dla wnikania ciepła:

$$q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \quad (5)$$

– dla przewodzenia ciepła:

$$q = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot \Delta t \quad (6)$$

– dla przenikania ciepła (równanie Pecleta):

$$q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (7)$$

gdzie:

$q$  [W] strumień ciepła.

W przypadku ustalonego procesu wymiany ciepła, energia cieplna w jednostce czasu  $q_{strAB}$  wnika od czynnika grzewczego do ścianki przewodu, następnie jest przewodzona wewnątrz ścianki przewodu i wnika ze ścianki przewodu do otoczenia, co uwzględniając postać równań (5), (6) i (7) można zapisać następująco:

– dla wnikania ciepła od czynnika grzewczego do powierzchni ścianki:

$$q_{strAB} = \alpha_w \cdot F_w \cdot (t_0 - t_1) \quad (8)$$

– dla przewodzenia ciepła przez ściankę o grubości  $s$ :

$$q_{strAB} = \frac{\lambda}{s} \cdot F_{sr} \cdot (t_1 - t_2) \quad (9)$$

– dla wnikania ciepła od powierzchni ścianki przewodu do otoczenia:

$$q_{\text{strAB}} = \alpha_z \cdot F_z \cdot (t_2 - t_3) \quad (10)$$

oraz sumarycznie:

$$q_{\text{strAB}} = k \cdot F_{\text{sr}} \cdot (t_0 - t_3) \quad (11)$$

Różnice temperatur w powyższych wzorach należy traktować jako średnie różnice na długości przewodu AB.

Z drugiej strony wartość straconego ciepła można określić na podstawie spadku temperatury czynnika grzewczego wzdłuż długości przewodu na odcinku A-B:

$$q_{\text{strAB}} = m^* \cdot (c_{pA} \cdot t_{0A} - c_{pB} \cdot t_{0B}) \quad (12)$$

gdzie:

$q$	[W]	strumień ciepła,
$m^*$	[kg/s]	masowe natężenie przepływu,
$c_p$	[J/kgK]	ciepło właściwe,
$t$	[°C]	temperatura.

Wartości ciepła właściwego  $c_{pA}$  i  $c_{pB}$  określa się wg tablic [1, 2] odpowiednio dla temperatur  $t_{0A}$  i  $t_{0B}$ .

Wartość masowego natężenia przepływu można określić, przeliczając odczytaną z przyrządów pomiarowych wartość objętościowego natężenia przepływu powietrza w przekroju pomiarowym F:

$$m^* = V^* \cdot \rho_F \quad (13)$$

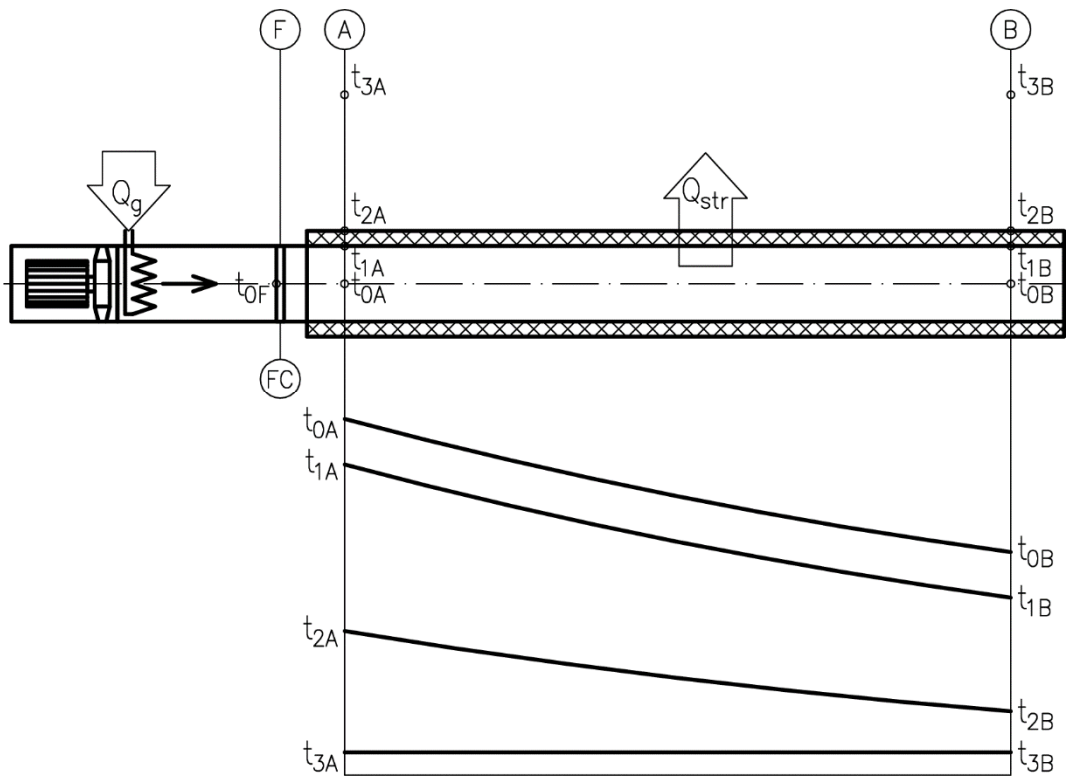
gdzie:

$\rho_F$	[Wkg/m <sup>3</sup> ]	gęstość powietrza w temperaturze $t_{0F}$ ,
$V^*$	[m <sup>3</sup> /s]	objętościowe natężenie przepływu.

Opisane zależności pozwalają na sporządzenie bilansu procesu przenikania ciepła. Na podstawie znajomości parametrów czynnika wewnątrz przewodu oraz parametrów otoczenia, możliwe jest wyznaczenie wartości współczynników  $\alpha$ ,  $\lambda$  i  $k$ .

### 3. Budowa stanowiska pomiarowego oraz metodyka badawcza i sposób wyznaczania współczynników

Doświadczalne wyznaczenie wartości współczynników przenikania, przewodzenia i wnikania ciepła jest możliwe na stanowisku badawczym, którego budowę przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Schemat stanowiska badawczego [4] (ozn. w tekście)

Stanowisko badawcze składa się z króćca, na końcu którego zamocowany jest badany przewód rurowy (np. elastyczna lutnia izolacyjna). Przewód ten należy zamocować w pozycji poziomej na wysokości co najmniej 1 m nad podłożem, licząc do dolnej krawędzi przewodu, w celu umożliwienia swobodnej wymiany ciepła wokół całej badanej lutni. Po stronie wlotowej podłącza się nagrzewnicę (dostarczającą do strumienia powietrza ciepło  $Q_g$ ) z wentylatorem oraz przewodem, w którym zlokalizowano przekrój pomiarowy F, w którym wyznaczane jest natężenie przepływu powietrza. W badanym przewodzie oznacza się przekroje pomiarowe A i B w odległości co najmniej 500 mm od wlotu i wylotu przewodu, dzięki czemu unika się zaburzeń przepływu mogących powstać w płaszczyźnie wlotowej i wylotowej przewodu. W przekrojach tych umieszcza się czujniki temperatury:

- $t_0$  – w rdzeniu czynnika grzewczego (w osi przewodu),
- $t_1$  – na ścianie przewodu po stronie wewnętrznej,
- $t_2$  – na ścianie przewodu po stronie zewnętrznej,
- $t_3$  – w otoczeniu przewodu, w odległości co najmniej 1 m od ścianki.

Badania rozpoczyna się od ustalenia warunków wymiany ciepła. W tym celu włącza się nagrzewnicę i wentylator powodując przepływ powietrza, a następnie, po ustaleniu warunków wymiany (wyznacznikiem będzie ustabilizowanie się wszystkich temperatur, gdy w ciągu 3 minut dana temperatura nie zmienia się o więcej niż  $0,1^\circ$ ) odczytuje się objętościowe natężenie przepływu czynnika (powietrza) w przekroju pomiarowym F oraz wartości temperatur:

- $t_{0F}$  – w rdzeniu czynnika w przekroju pomiarowym F,
- $t_{0A}$  – w rdzeniu czynnika w przekroju pomiarowym A,
- $t_{1A}$  – na ścianie przewodu po stronie wewnętrznej w przekroju pomiarowym A,

- $t_{2A}$  – na ściance przewodu po stronie zewnętrznej w przekroju pomiarowym A,
- $t_{3A}$  – otoczenia w przekroju pomiarowym A,
- $t_{0B}$  – w rdzeniu czynnika w przekroju pomiarowym B,
- $t_{1B}$  – na ściance przewodu po stronie wewnętrznej w przekroju pomiarowym B,
- $t_{2B}$  – na ściance przewodu po stronie zewnętrznej w przekroju pomiarowym B,
- $t_{3B}$  – otoczenia w przekroju pomiarowym B.

Wyznacza się również odległość między przekrojami pomiarowymi  $L_{AB}$ .

Z tablic [1, 2] należy odczytać wartości:

- $\rho_F$  – gęstości powietrza w temperaturze  $t_{0F}$ ,
- $c_{pA}$  – ciepła właściwego powietrza w temperaturze  $t_{0A}$ ,
- $c_{pB}$  – ciepła właściwego powietrza w temperaturze  $t_{0B}$ .

Na podstawie ww. wartości wg wzoru (13) przelicza się objętościowe natężenie przepływu  $V^*$  na natężenie masowe  $m^*$ , a następnie wg wzoru (12) oblicza się wielkość strumienia ciepła straconego poprzez transport ciepła przez ścianki przewodu  $q_{strAB}$ .

Znając średnicę wewnętrzną  $D_1$  i zewnętrzną  $D_2$  przewodu oblicza się powierzchnie:

- wewnętrzną:

$$F_w = \pi \cdot D_1 \cdot L_{AB} \quad (14)$$

- średnią:

$$F_{sr} = \pi \cdot \frac{D_2 - D_1}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \cdot L_{AB} \quad (15)$$

- zewnętrzną:

$$F_z = \pi \cdot D_2 \cdot L_{AB} \quad (16)$$

oraz grubość ścianki:

$$s = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (17)$$

Następnie oblicza się średnie różnice temperatur dla przekrojów A i B:

$$(t_0 - t_1) = \frac{(t_{0A} - t_{1A}) - (t_{0B} - t_{1B})}{\ln \frac{(t_{0A} - t_{1A})}{(t_{0B} - t_{1B})}} \quad (18)$$

$$(t_1 - t_2) = \frac{(t_{1A} - t_{2A}) - (t_{1B} - t_{2B})}{\ln \frac{(t_{1A} - t_{2A})}{(t_{1B} - t_{2B})}} \quad (19)$$

$$(t_2 - t_3) = \frac{(t_{2A} - t_{3A}) - (t_{2B} - t_{3B})}{\ln \frac{(t_{2A} - t_{3A})}{(t_{2B} - t_{3B})}} \quad (20)$$

$$(t_3 - t_4) = \frac{(t_{3A} - t_{4A}) - (t_{3B} - t_{4B})}{\ln \frac{(t_{3A} - t_{4A})}{(t_{3B} - t_{4B})}} \quad (21)$$

Poszczególne wartości współczynników wnikania ciepła i współczynnika przewodzenia ciepła oblicza się podstawiając wartości obliczone wg wzorów (14) – (21) i wartość ciepła

traconego przez ściankę  $Q_{str}$  wyrażoną w jednostce czasu, tj. strumienia ciepła  $q_{strAB}$  do odpowiednio przekształconych wzorów (8) – (10):

$$\alpha_w = \frac{q_{strAB}}{F_w(t_0-t_1)} \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{sq_{strAB}}{F_{sr}(t_1-t_2)} \quad (23)$$

$$\alpha_z = \frac{q_{strAB}}{F_z(t_2-t_3)} \quad (24)$$

Wartość współczynnika przenikania ciepła oblicza się podstawiając do wzoru (4) wartości obliczone wg wzorów (17) oraz (22) – (24).

Przedstawiona metoda przewiduje wyznaczenie w badanym odcinku przewodu jedynie dwóch przekrojów pomiarowych – wlotowego i wylotowego. Dokładność wyznaczenia współczynników wnikania, przewodzenia i przenikania ciepła można zwiększyć dzieląc przewód na kilka krótszych odcinków pomiarowych i wyznaczając wartości współczynników dla każdego odcinka w analogiczny sposób, a następnie przyjmując wartości średnie, jako wartości dla całego przewodu.

Do obliczeń należy przyjąć dane fizykochemiczne powietrza wg tablic [np. 2].

Gęstość powietrza w warunkach rzeczywistych można wyznaczyć zgodnie z metodyką stosowaną podczas badań wentylatorów lutniowych [3]:

- Ciśnienie cząstkowe [Pa] pary wodnej w powietrzu wilgotnym w temperaturze  $t_0$

$$P_{p0} = \varphi_0 \cdot P_{s0} \quad (25)$$

gdzie:  $\varphi_0$  – wilgotność względna, wg odczytu w %,

$P_{s0}$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w Pa, w stanie nasycenia w temperaturze  $t_0$ .

- Udział objętościowy pary suchej w powietrzu wilgotnym

$$r_p = \frac{P_{p0}}{P_b} \quad (26)$$

gdzie:  $P_b$  – ciśnienie barometryczne w Pa

- Wykładnik adiabaty „ $\kappa$ ” powietrza wilgotnego

$$\kappa = \frac{0,132}{0,33 + 0,07 \cdot r_p} + 1 \quad (27)$$

- Stała gazowa powietrza wilgotnego [J/kgK]

$$R = \frac{287,04}{1 - 0,378 \cdot r_p} \quad (28)$$

- Gęstość powietrza  $\rho_x$  [kg/m<sup>3</sup>] w przekroju pomiarowym x

$$\rho_x = \frac{P_b}{R \cdot (273,15 + t_x)} \quad (29)$$

gdzie:

$t_x$  [°C] temperatura w przekroju pomiarowym x



#### 4. Podsumowanie, wnioski

Przedstawiona metodyka badań lutni elastycznych pozwala na szybkie wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła przez ścianki lutni elastycznych, wraz z jego składowymi, tj. współczynnikiem przewodzenia ciepła i współczynnikami wnikania ciepła po wewnętrznej i zewnętrznej stronie ścianki lutni. Pozwala na badanie lutni izolacyjnych w szerokim zakresie średnic, ograniczonym jedynie możliwościami uzyskania objętościowego natężenia przepływu powietrza i jego pomiaru.

Nie są wymagane skomplikowane i długotrwałe pomiary. Ograniczają się one do wyznaczenia wartości temperatur, przepływu powietrza oraz cech geometrycznych lutni. Jedyną niedogodnością może być konieczność oczekiwania na ustalenie się warunków procesu wymiany ciepła (tzw. „wygrzanie” układu) oraz wymóg prowadzenia badań przy niezmiennych warunkach otoczenia (tj. w zamkniętym pomieszczeniu, bez przewiewu powietrza z zewnątrz).

Możliwe jest wykonywanie badań przy dużym gradiencie temperatury między gorącym strumieniem powietrza wewnątrz lutni a otoczeniem.

#### Literatura

- [1] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986
- [2] Praca zbiorowa pod red. Jana Bandrowskiego: Materiały pomocnicze do ćwiczeń i projektów z inżynierii chemicznej, skrypt uczelniany nr 1760, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993
- [3] Jedziniak M., Holona P.: Metodyka badań wentylatorów lutniowych, ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały niepublikowane)
- [4] Jedziniak M., Holona P.: Metodyka wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła dla lutni elastycznych. ITG KOMAG, Gliwice 2016 (materiały niepublikowane)