

BUDOWNICTWO

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2-B/2010

ZESZYT 4

ROK 107

ISSUE 4

YEAR 107

ANTONI MALINOWSKI, WŁODZIMIERZ TURKOWSKI, ANDRZEJ MUZYCZAK*

ANALIZA STANÓW HYDRAULICZNYCH CELEM OPTYMALIZACJI PRACY SYSTEMÓW OGRZEWANIA BUDYNKÓW MIESZKALNYCH

THE ANALYSIS OF HYDRAULIC REGIMES FOR THE PURPOSE OF OPTIMIZATION OF WORK OF HEATING SYSTEMS OF APARTMENT BUILDINGS

Streszczenie

Możliwości opracowanego wcześniej przez autorów modelu matematycznego sieci ciepłych zewnętrznych zostały poszerzone na wewnętrzne sieci budynków, co jest aktualne w wypadkach zależnego przyłączenia instalacji wewnętrznych odbiorców. To stwarza możliwości analizy tych sieci jako całości z uwzględnieniem ich wpływów wzajemnych.

Słowa kluczowe: sieci ciepłe, obliczenia hydrauliczne, formalizowane metody

Abstract

Possibilities of the model of an external network of a heat supply developed earlier by authors are passed round to internal networks of buildings that is actual for circuit designs of dependent joining of consumers. It gives the chance to analyse these networks as a uniform organism and to consider their mutual influence.

Keywords: heat networks, hydraulic calculations, formal methods

* Prof. dr hab. inż. Antoni Malinowski; doc. inż. Włodzimierz Turkowski; mgr inż. Andrzej Muzyczak, Instytut Inżynierii Energetycznej i Kontroli Systemów, Politechnika Lwowska.

Oznaczenia

ξ	– opór hydrauliczny miejscowy
h_{gr}	– ciśnienie grawitacyjne
\overline{H}	– wektor ciśnień czynnych w gałęziach sieci, wytworzonych przez pompę
H_{cs}	– ciśnienie ciężaru słupa nośnika
h	– strata ciśnienia
\overline{G}	– wektor wycieków nośnika ciepła
\mathbf{A}	– pierwsza macierz incydencji
\mathbf{B}	– druga macierz incydencji
\overline{x}	– wektor natężeń przepływów nośnika ciepła w gałęziach sieci
ρ	– gęstość nośnika ciepła

1. Wstęp

Sprawność energetyczną systemów ogrzewczych określają złożone i wzajemnie współzależne procesy hydrauliczne i wymiany ciepła. Instrumentem wykonania pełnych obliczeń hydraulicznych systemów centralnego ogrzewania jest dzisiaj teoria obwodów hydraulicznych (TOH) [1, 2], która opiera się na formalizowanych metodach analizy systemów sieciowych. I choć wydano sporo monografii dotyczących stosowania tej teorii do obliczeń sieci cieplnych, nie ma dotychczas przykładów jej zastosowania do obliczeń sieci wewnątrz budynku. Do takich obliczeń tradycyjnie stosowane są metody obliczeń według jednostkowych liniowych spadków ciśnienia w przewodach oraz metody obliczeń według charakterystyk oporów hydraulicznych [3, 4]. W obu metodach najpierw wykonuje się obliczenie głównego obiegu cyrkulacyjnego, a potem obiegów drugorzędnych z uwzględnieniem wyników obliczeń obiegu głównego.

2. Analiza

Obliczenie pierwszą metodą odtwarza fizyczny podział oporów w systemie, jednak występuje niezgodność wartości strat ciśnienia w sąsiednich obiegach cyrkulacyjnych. Obliczenie hydrauliczne drugą metodą stosuje się w wypadkach podwyższonej szybkości przepływu nośnika ciepła w systemie, kiedy jest uzasadnione wykorzystanie stałych wartości współczynników tarcia liniowego oraz oporu miejscowego ξ [3].

W wymienionych metodach obliczeń hydraulicznych sieci cieplne dzielone są na poszczególne odcinki. Obliczenia dla każdego odcinka wykonywane są oddzielnie, bez uwzględnienia ich wpływu wzajemnego. Przy takim podejściu nie ma możliwości oceny wspólnego działania i wpływu wzajemnego sieci wewnątrz budynku z instalacją wejściową, a tym bardziej z układem sieciowym zewnętrznym.

Potrzebne jest więc opracowanie modelu sieci cieplnej wewnętrznej i poszczególnych jej elementów, który umożliwi stosowanie takich podejść TOH, jakich używa się do sieci zewnętrznych [1].

W obliczeniach hydraulicznych sieci wewnątrz budynku sieci muszą być uwzględnione dwie okoliczności, jakie nie są brane pod uwagę w obliczeniach sieci zewnętrznych. Po pierwsze, tu nie można przyjąć stałego oporu hydraulicznego trójników – jego wartość powinna być ustalona w zależności od wielkości przepływów nośnika ciepła w gałęziach trójnika [3, 4]. Po drugie, należy uwzględniać ciśnienie grawitacyjne, wynikające z ochłodzenia nośnika w przewodach i odbiornikach ciepła [3, 4].

Model matematyczny trójnika, dostosowany do wykorzystania w ramach TOH, jest opisany w [5]. Ten model naturalnie uwzględnia sieciowy charakter systemów ciepłych i nadaje się do wykorzystania zarówno w modelach sieci ciepłych zewnętrznych, jak i w modelach sieci wewnętrznych.

W obliczeniach wartości cyrkulacyjnego ciśnienia grawitacyjnego wykorzystywane jest pojęcie środka ochłodzenia nośnika ciepła [3, 4]. Stopniowa rzeczywista zmiana temperatury wzdłuż odbiornika ciepła jest ekwiwalentowana skokową zmianą temperatury w środku ochłodzenia. Z wprowadzeniem takiej umownej granicy ochłodzenia uważa się, że w każdej połowie urządzenia nośnik ciepła ma stałą gęstość. Podobną granicę zmiany temperatury nośnika ciepła w instalacji wejściowej do budynku nazywa się środkiem nagrzewania. Wtedy wartość ciśnienia grawitacyjnego w obiegu h_{gr} można obliczyć stosując wzór [3, 4]

$$h_{gr} = gl(\rho_0 - \rho_n) \quad (1)$$

gdzie:

- ρ_0, ρ_n – gęstość nośnika ciepła, odpowiednio, w środku ochłodzenia i środku nagrzewania,
- l – różnica wysokości między tymi środkami,
- g – przyspieszenie ziemskie.

W formalizowanych metodach analizy naturalne ciśnienie grawitacyjne oblicza się jako sumę ciśnień ciężaru słupa nośnika wszystkich gałęzi w obwodzie. Ciśnienie ciężaru słupa nośnika gałęzi

$$H_{cs} = \rho g(z_p - z_k) \quad (2)$$

gdzie:

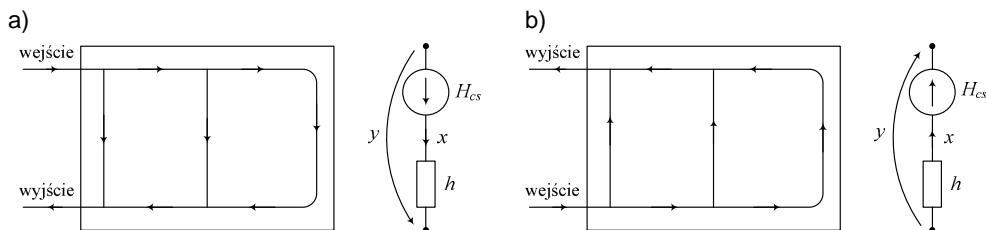
- z_p, z_k – wysokość węzłów gałęzi, początkowego i końcowego,
- ρ – gęstość nośnika ciepła w gałęzi.

W systemach ogrzewania możliwe jest przyłączenie urządzeń tak ze skierowaniem strumienia nośnika z góry w dół (rys. 1a), jak i ze skierowaniem z dołu do góry (rys. 1b).

Ciśnienie ciężaru nośnika w gałęzi H_{cs} zawsze jest skierowane w dół. W formalizowanych metodach kierunek ciśnienia ciężaru nośnika przyjmuje się jako zbieżny ze skierowaniem gałęzi. Jeżeli nośnik ciepła jest skierowany w dół ($z_p > z_k$), jego wartość będzie dodatnia, w wypadku skierowania nośnika do góry ($z_p < z_k$) – ujemna.

W zapisie macierzowym wzór (2) nabiera postaci

$$\overline{H_{cs}} = g(\mathbf{A}_0 \boldsymbol{\rho})^T \overline{z_0} \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat przyłączenia cieplnego ze skierowaniem nośnika ciepła z góry w dół (a), z dołu do góry (b)

Fig. 1. The circuit of connection of a heating body in a heat-transfer agent direction from top to down (a), bottom-up (b)

gdzie:

- \bar{H}_{cs} – wektor ciśnień ciężaru słupa nośnika w gałęziach sieci cieplnej,
- \bar{z}_0 – wektor wysokości niwelacyjnych węzłów sieci,
- \mathbf{A}_0 – pełna pierwsza macierz incydencji,
- $\boldsymbol{\rho}$ – macierz diagonalna wartości gęstości nośnika ciepła w gałęziach sieci (ustala się według wyników poprzednich obliczeń cieplnych).

Macierzowy opis sieci cieplnej według [6] z uwzględnieniem ciśnień ciężarowych przyjmuje postać

$$\begin{cases} \mathbf{A}\bar{x} = \bar{G} \\ \mathbf{B}\left(\mathbf{S}_1|\bar{x}| + \mathbf{S}_2|\bar{x}|^2 + \mathbf{S}_3|\bar{x}|^3\right) \operatorname{sgn}(\bar{x}) = \mathbf{B}\bar{H} + \mathbf{B}\bar{H}_{cs} \end{cases} \quad (4)$$

albo z wykorzystaniem (3) – postać

$$\begin{cases} \mathbf{A}\bar{x} = \bar{G} \\ \mathbf{B}\left(\mathbf{S}_1|\bar{x}| + \mathbf{S}_2|\bar{x}|^2 + \mathbf{S}_3|\bar{x}|^3\right) \operatorname{sgn}(\bar{x}) = \mathbf{B}\bar{H} + g\mathbf{B}(\mathbf{A}_0\boldsymbol{\rho})^T \bar{z}_0 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

- \mathbf{A}, \mathbf{B} – pierwsza i druga macierz incydencji,
- \bar{x} – wektor natężeń przepływów nośnika ciepła w gałęziach sieci,
- \bar{G} – wektor wycieków nośnika w liniowo niezależnych węzłach sieci,
- $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ – macierze współczynników funkcji aproksymujących naporowo-natężeniowe charakterystyki gałęzi sieci,
- \bar{H} – wektor ciśnień czynnych wytworzonych przez pompę w gałęziach sieci.

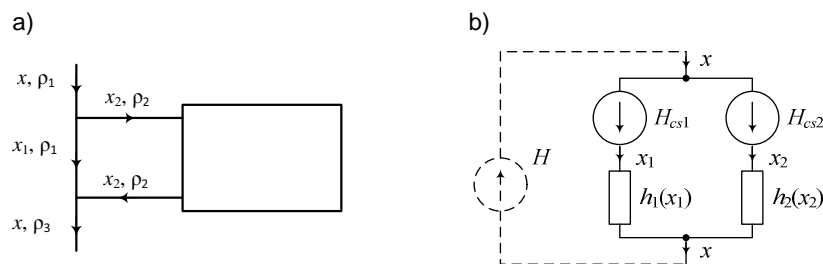
Porównamy efektywność tradycyjnych metod obliczeń hydraulicznych i obliczeń według zaproponowanego modelu matematycznego na przykładzie jednorurowego układu

instalacji centralnego ogrzewania. W tym wypadku dobrze ujawniają się szczegóły obliczeń hydraulicznych sieci ciepłych wewnętrznych.

W jednorurowych układach ogrzewania oprócz głównego i drugorzędnych obiegów cyrkulacyjnych wyodrębniają się małe obiegi cyrkulacyjne, które są tworzone przez odbiorniki ciepła z odcinkami zasilania i odcinki zamykające (rys. 2a).

Według przyjętego uproszczenia skokowej zmiany temperatury nośnika ciepła, wartości gęstości nośnika w odcinkach zasilania i w samym odbiorniku są jednakowe (ρ_2). Gęstość nośnika (oraz temperatura) w odcinku zamykającym jest taka sama jak przed małym obiegiem (ρ_1). Temperatura nośnika i jego gęstość po obiegu (ρ_3) są ustalane według równania zmieszania nośnika ciepła.

W tradycyjnych metodach w obliczaniach jednorurowych systemów ogrzewania trudno ustalić ilość nośnika rozchodzącego się na odbiornik ciepła i płynącego przez bocznik zamykający. Zazwyczaj jest tu wykorzystywane pojęcie współczynnika rozptywu nośnika w urządzenie α_{ur} , z uwzględnieniem którego $x_2 = \alpha_{ur}x$, a $x_1 = (1 - \alpha_{ur})x$.



Rys. 2. Mały obieg cyrkulacyjny (a) i jego schemat zastępczy (b)

Fig. 2. Small flow circuit (a) and its equivalent circuit (b)

Współczynnik rozptywu nośnika ciepła w urządzeniu ustala się za pomocą specjalnych nomogramów, tabeli lub według wzorów z [3, 4]. Ustalenie wartości współczynnika rozptywu jest skomplikowane z powodu zależności oporów hydraulicznych trójników od rozptywu nośnika w ich gałęziach, to znaczy od natężeń przepływów, które są ustalane. Na przepływ nośnika w urządzeniu ma wpływ także naturalne ciśnienie grawitacyjne.

Zazwyczaj na początku obliczeń wartość współczynnika zaciekania nośnika w urządzenie przyjmuje się w przybliżeniu [3, 4]. Potem ustala się straty ciśnienia na małym obiegu cyrkulacyjnym z uwzględnieniem ciśnienia grawitacyjnego obiegu przy użyciu wzoru

$$h_{m.o} = h_1(x_1) \pm gl_{ur}(\rho_2 - \rho_1) \quad (6)$$

gdzie:

$h_1(x_1)$ – straty ciśnienia w odcinku zamykającym,

l_{ur} – wysokość odbiornika ciepła.

W równaniu (6) plus odpowiada kierunkowi ruchu nośnika w pionie z góry w dół, minus – z dołu do góry.

Jeżeli współczynnik α_{ur} przyjęty jest prawidłowo, to straty ciśnienia w odcinkach zasilania i w samym odbiorniku ciepła są równe $h_{m.o}$. W przeciwnym wypadku współczynnik α_{ur} należy skorygować.

Przejdźmy do przykładu obliczeń metodami tradycyjnymi zamieszczonego w [3]. W tym przykładzie średnica rury stojaka wynosi 20 mm, odcinków zasilania urządzenia i odcinka zamykającego – 15 mm. Współczynnik rozplywu nośnika w urządzeniu $\alpha = 0,33$.

Wyniki obliczeń według [3] podane są w tabeli 1.

Naturalne ciśnienie grawitacyjne według (1)

$$gl_{ur}(\rho_2 - \rho_1) = 9,81 \cdot 0,5(967,6 - 961,7) = 29 \text{ Pa}$$

Straty ciśnienia w małym obiegu cyrkulacyjnym według (6)

$$h_{m.o} = 49 + 29 = 78 \text{ Pa}$$

Jak widać, straty ciśnienia małego obiegu cyrkulacyjnego są nieco wyższe od strat w odcinkach zasilania i w urządzeniu, to znaczy, że wartość współczynnika rozplywu nośnika w urządzeniu będzie nieco większa od przyjętej.

Tabela 1

**Wyniki obliczenia hydraulicznego małego obiegu cyrkulacyjnego
jednorurowego układu ogrzewania**

	x , [kg/h] [kg/s]	Średnica, [mm]	Długość l , [m]	Linowy spadek ciśnienia R , [Pa/m]	Opór miejscowy ξ	Spadek ciśnienia h , [Pa]
Pion	180 (0,05)	20				
Bocznik	120 (0,0333)	15	0,5	39	2,3	49
Odbiornik z odcinkami zasilania	60 (0,0167)	15	2	10	14,6	67

Wykonamy teraz obliczenia z wykorzystaniem zaproponowanego modelu. Stosując model (5), nie ma potrzeby specjalnego wyznaczania współczynnika rozplywu nośnika w urządzeniu. Natężenie przepływu nośnika ciepła we wszystkich gałęziach sieci jest otrzymywane automatycznie wskutek rozwiązania systemu równań (5). Schemat zastępczy małego obiegu cyrkulacyjnego jest pokazany na rys. 2b.

Naporowo-natężeniowe charakterystyki gałęzi sieci aproksymujemy wielomianem kwadratowym. Współczynnik oporu hydraulicznego wyznaczamy według równania

$$s_i = h_i / x_i^2 \quad (7)$$

Według [5] dla trójników, w których powierzchnia przekroju poprzecznego wspólnej gałęzi równa się sumie powierzchni przekroju gałęzi prostej i bocznej, a kąt między gałęziami prostą i boczną wynosi 90° , współczynniki – elementy macierzy S_2 – w przybliżeniu warunkach pracy wynoszą

$$\xi_p = 1,358, \quad \xi_b = -0,849, \quad \xi_w = -0,316,$$

$$\varphi_{pw} = 0, \quad \varphi_{wp} = -0,354, \quad \varphi_{bw} = -0,849, \quad \varphi_{wb} = 0,408,$$

a w wyciągowych warunkach pracy

$$\xi_p = 1,0, \quad \xi_b = 1,0, \quad \xi_w = 0,565,$$

$$\phi_{pw} = 1,0, \quad \phi_{wp} = -0,033, \quad \phi_{bw} = 0,0, \quad \phi_{wb} = 0,03$$

gdzie:

ξ_p, ξ_b, ξ_w – współczynniki oporu hydraulicznego, odpowiednio, prostej, bocznej i wspólnej gałęzi trójkąta,
 $\phi_{pw}, \phi_{wp}, \phi_{bw}, \phi_{wb}$ – współczynniki wpływów przyległych gałęzi trójkątów.

Dla zabezpieczenia natężenia przepływu nośnika w pionie 180 kg/h czynny napór H (rys. 2b) ma być równy 32,3 Pa. Według wyników obliczeń natężenie przepływu nośnika ciepła w urządzeniu wynosi 66,9 kg/h, w odcinku zamykającym – 113,1 kg/h, a współczynnik rozprężenia nośnika do urządzenia

$$\alpha_{ur} = \frac{66,9}{66,9 + 113,1} = 0,371$$

Jak przewidziano w [3], wartość współczynnika zaciekania jest wyższa od przyjętej tam wartości, różnica wynosi 12,4%.

Jeżeli nie uwzględnimy naturalnego ciśnienia grawitacyjnego, to natężenie przepływu nośnika w urządzeniu wyniesie 49,4 kg/h, w odcinku zamykającym – 113,7 kg/h. Współczynnik rozprężenia nośnika w urządzenie wyniesie – 0,303, a błąd obliczeń – 18,3%.

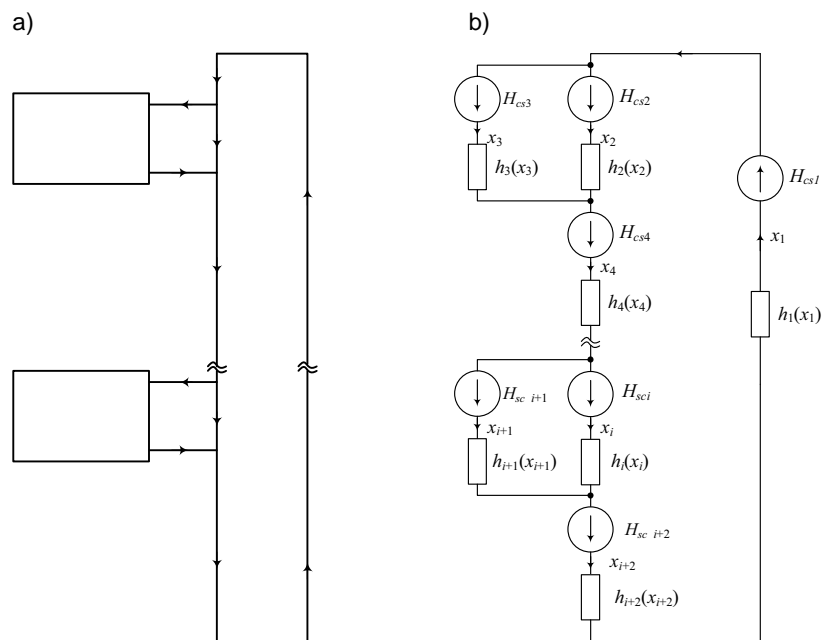
Jeżeli przyjmujemy stały współczynnik oporu miejscowego trójkąta (dla trójkąta przyplęwnego $\xi_p = 1,0$, $\xi_b = 1,5$, dla trójkąta wyciągowego $\xi_w = 1,5$), to otrzymamy wartość natężenia przepływu nośnika w urządzeniu równą 58,1 kg/h, a w odcinku zamykającym – 67,8 kg/h. Teraz współczynnik rozprężenia nośnika w urządzenie wynosi 0,461, błąd obliczeń – 24,2%.

To potwierdza potrzebę uwzględnienia w układzie równań (5) naturalnego ciśnienia grawitacyjnego i zależności oporów trójkątów od rozprężenia nośnika w ich gałęziach.

Podobnie można obliczyć stan hydrauliczny stojaka jednorurowego systemu ogrzewania oraz całej sieci wewnętrznej. Dla przykładu na rys. 3b jest pokazany schemat zastępczy jednego pionu z osiowymi odcinkami zamykającymi (rys. 3a) i górnym rozdziałem nośnika.

Na zakończenie zauważmy, że z wykorzystaniem nieskomplikowanych algorytmów przekształceń szeregowo czy równoległe połączonych gałęzi schemat zastępczy pionu (rys. 3b) albo całej sieci wewnątrz budynku może być zredukowany do jednej gałęzi z ekwiwalentną naporowo-natężeniową charakterystyką $h_{ekw}(x_1)$.

Ekwiwalentowanie sieci cieplnej budynku pozwala na wykorzystanie bez zmian opracowanych przez autorów pakietów programów analizy miejskich systemów ciepłowniczych [7].



Rys. 3. Schemat sieci pionu jednorurowego systemu ogrzewania (a) i jego schemat zastępczy (b)

Fig. 3. The circuit of tower one-pipe heating system (a) and its equivalent circuit (b)

3. Podsumowanie

1. Opracowany model matematyczny orientowany jest na wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci ciepłych wewnątrz budynku z wykorzystaniem efektywnych metod formalizowanych.
2. Zaproponowany model sieci wewnątrz budynku umożliwia wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci zewnętrznych i wewnętrznych jako całości.
3. Rozpatrzone podejście pozwala na uwzględnianie wpływu na sieć ciepłą zmian charakterystyk hydraulicznych w sieci odbiorcy, czyli uwzględnianie miejscowej regulacji ilościowej.

Literatura

- [1] Меренков А.П., Хасилев В.Я., *Теория гидравлических цепей* – М.: Наука, 1985, 278.
- [2] Malinowski A., Turkowski W., Muzyczak A., *Komputerowe wspomaganie racjonalizacji systemów ogrzewania budynków mieszkalnych*, Międzynarodowe seminarium „Energodom 2006”, część II, 443-450.

- [3] *Внутренние санитарно-технические устройства*. В 3 ч. Ч.I. Отопление/В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканави и др.; Под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990, 344.: ил. – (Справочник проектировщика).
- [4] Сканави А.Н., *Отопление: Учеб. для вузов, обучающихся по направлению «Строительство», специальности 290700 / Л.М.Махов* – М.: АСВ, 2002, 576 с.: ил.
- [5] Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З., *Математична модель вузлів гідравлічних кіл (на прикладі витяжного трійника)* // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Теплоенергетика, Інженерія довкілля. Автоматизація – 2010, No. 659.
- [6] Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З., *Дослідження гідравлічних режимів теплових мереж формалізованими методами*. Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність 2004». Додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія» – с. 258-261.
- [7] Malinowski A., Turkowski W., Muzyczak A., *Taras Greczyn, Komputerowe wspomaganie audytingu energetycznego miejskich systemów ciepłowniczych*, Międzynarodowe seminarium „Energodom 2008”, 321-329.