

## COMPUTER SYSTEM FOR THE SIMULATION OF THE HEAT TRANSFER IN A STONE REGENERATOR

### Summary

The research of the heat exchange in the stone regenerator with a randomised substrate bed and a stochastic temperature of the environment, leading to identification of the characteristics of random physical values describing that process is practically impossible to conduct without a dedicated computer system. The basis for the construction of this comfortable and, at the same time, essential research tool was the original mathematical model created with the use of deductive inference and taking into account the conditioning mentioned above and the irregularity of the air flow through the bed recognised earlier. The computer system presented by the authors was created according to the rules of software engineering and using graphic notation UML 2.0 in the modelling process. It is also worth noting the fact of partly imaging the methodology of further research in the application, the conducting of which had to have been preceded by the process of the test application and the empirical verification of the model.

## SYSTEM INFORMATYCZNY DO SYMULACJI PRZEPŁYWU CIEPŁA W KAMIENNYM AKUMULATORZE

### Streszczenie

Badanie przepływu ciepła w kamiennym akumulatorze ciepła o strukturze losowej złoża oraz stochastycznym charakterze temperatury otoczenia, zmierzające do identyfikacji cech losowych wielkości fizycznych, opisujących ten proces jest praktycznie niemożliwe bez posiadania dedykowanego systemu informatycznego. Podstawą budowy tego wygodnego, a zarazem niezbędnego narzędzia badawczego był oryginalny model matematyczny, powstały na drodze wnioskowania dedukcyjnego, uwzględniający sygnalizowane powyżej uwarunkowania oraz rozpoznaną wcześniej nierównomierność przepływu powietrza przez złożę. Prezentowany przez autorów system informatyczny, wytworzono zgodnie z regułami inżynierii oprogramowania, stosując w procesie modelowania dziedziny problemowej notację graficzną UML 2.0. Ważnym odnotowania jest również fakt, odwzorowania w aplikacji częściowo metodyki dalszych badań, których realizacja musiała być poprzedzona procesem testowaniem aplikacji i empirycznej weryfikacji modelu.

### 1. Wprowadzenie

Efektywne badania i wyjaśnianie systemów empirycznych rolnictwa wymaga szeregu zabiegów poznawczych, wśród których kluczowym elementem jest modelowanie wspomnianych systemów z interesującej nas perspektywy. Ten sposób postępowania pozwala nam zapanować nad złożonością rzeczywistości, a z drugiej strony dostarcza narzędzi istotnych z użytecznego punktu widzenia. Satysfakcjonującym nas rezultatem podjętych wysiłków badawczych jest uzyskanie modelu zapisanego w formie struktur matematycznych. Kolejnym krokiem naszych poczynań badawczych, występującym coraz częściej, jest odwzorowanie otrzymanego modelu matematycznego w postaci obiektów informatycznych, tworzących aplikację. Z uwagi na przyjętą przez autorów tematykę badawczą, obejmującą procesy cieplne zachodzące w kamiennym akumulatorze o losowej strukturze wypełnienia i stochastycznym oddziaływaniu otoczenia powyższa metodyka postępowania wydaje się rozwiązaniem w pełni uzasadnianym, pozbawionym na dzień dzisiejszy alternatywy. Uwzględnienie w procesie modelowania losowości implikuje probabilistyczny charakter wielkości fizycznych, opisujących proces cieplny. Identyfikacja ich cech losowych poprzez badanie systemów empirycznych jest praktycznie niemożliwa przy zachowaniu kryterium racjonalności. Tych ograniczeń eksploracyjnych

nie napotykamy, gdy dysponujemy odpowiednim systemem informatycznym.

### 2. Model matematyczny przepływu ciepła

Podstawą budowy prezentowanego systemu informatycznego był nowy probabilistyczny model przepływu ciepła zachodzącego w kamiennym regeneratorsie podczas fazy ładowania, który pełniej, w stosunku do wcześniejszych modeli [4] uwzględnia losowość struktury złoża przy jednoczesnym odwzorowaniu nierównomierności przepływu powietrza przez akumulator.

Postać modelu tworzy poniższy układ równań moltiplikowany podziałem akumulatora na sekcje w płaszczyźnie YZ:

$$\dot{m} c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = \underline{hA}(T_f - T_m) \quad (1)$$

$$B(1 - \varepsilon) \rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \underline{hA}(T_f - T_m) - UA_{ww}(T_m - T_{fe}) \quad (2)$$

wraz z warunkami początkowo-brzegowymi:

dla  $x = 0$ :

$$T_f = T_{fo} \quad (3)$$

oraz dla  $t = 0$ :

$$T_m = T_{mp} \quad (4)$$

gdzie:

- A - powierzchnia międzyfazowa przypadająca na jednostkę długości regeneratora,
- $A_{ww}$  - wewnętrzna powierzchnia graniczna akumulatora przypadająca na jednostkę długości regeneratora,
- B - wielkość pola przekroju poprzecznego regeneratora,
- $T_f$  - temperatura płynu,
- $T_m$  - temperatura kamienia,
- $T_{fo}$  - temperatura płynu wchodzącego do złoża,
- $T_{fe}$  - temperatura otoczenia,
- $T_{mp}$  - temperatura początkowa magazynu,
- h - współczynnik wnikania ciepła na granicy dwóch ośrodków,
- $c_f$  i  $c_m$  - ciepło właściwe płynu i kamienia,
- $\dot{m}$  - masowe natężenie przepływu,
- $\mathcal{E}$  - porowatość ośrodka,
- $\rho_m$  - gęstość kamienia,
- t - czas,
- U - współczynnik wymiany ciepła pomiędzy ścianą regeneratora a otoczeniem,
- x - współrzędna liniowa.

Wielkości podkreślone w powyższych równaniach to zmienne losowe. Pełniejszy opis modelu stanowi treść pracy doktorskiej [4] i w najbliższym czasie zostanie zaprezentowa-

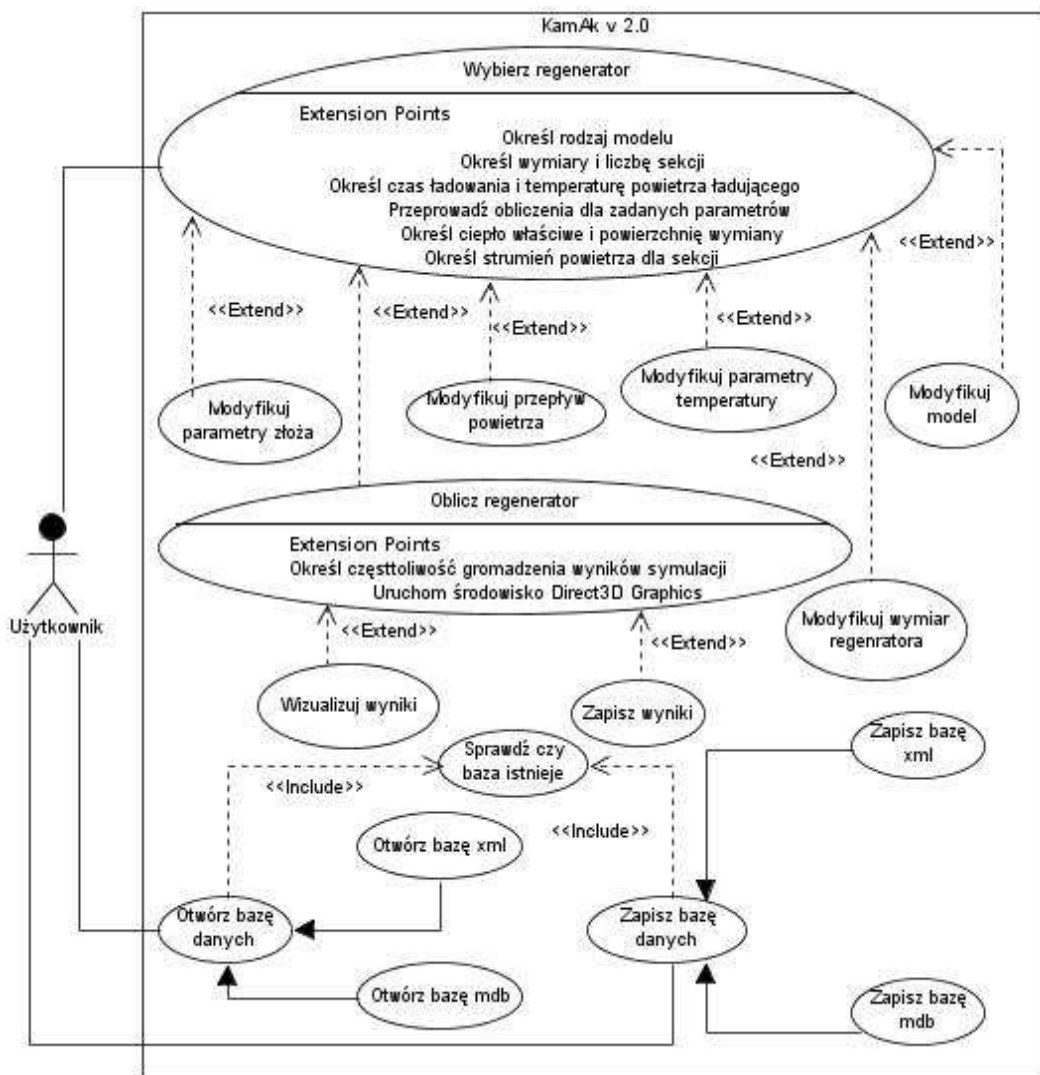
wany w publikacji.

### 3. Projektowanie systemu informatycznego

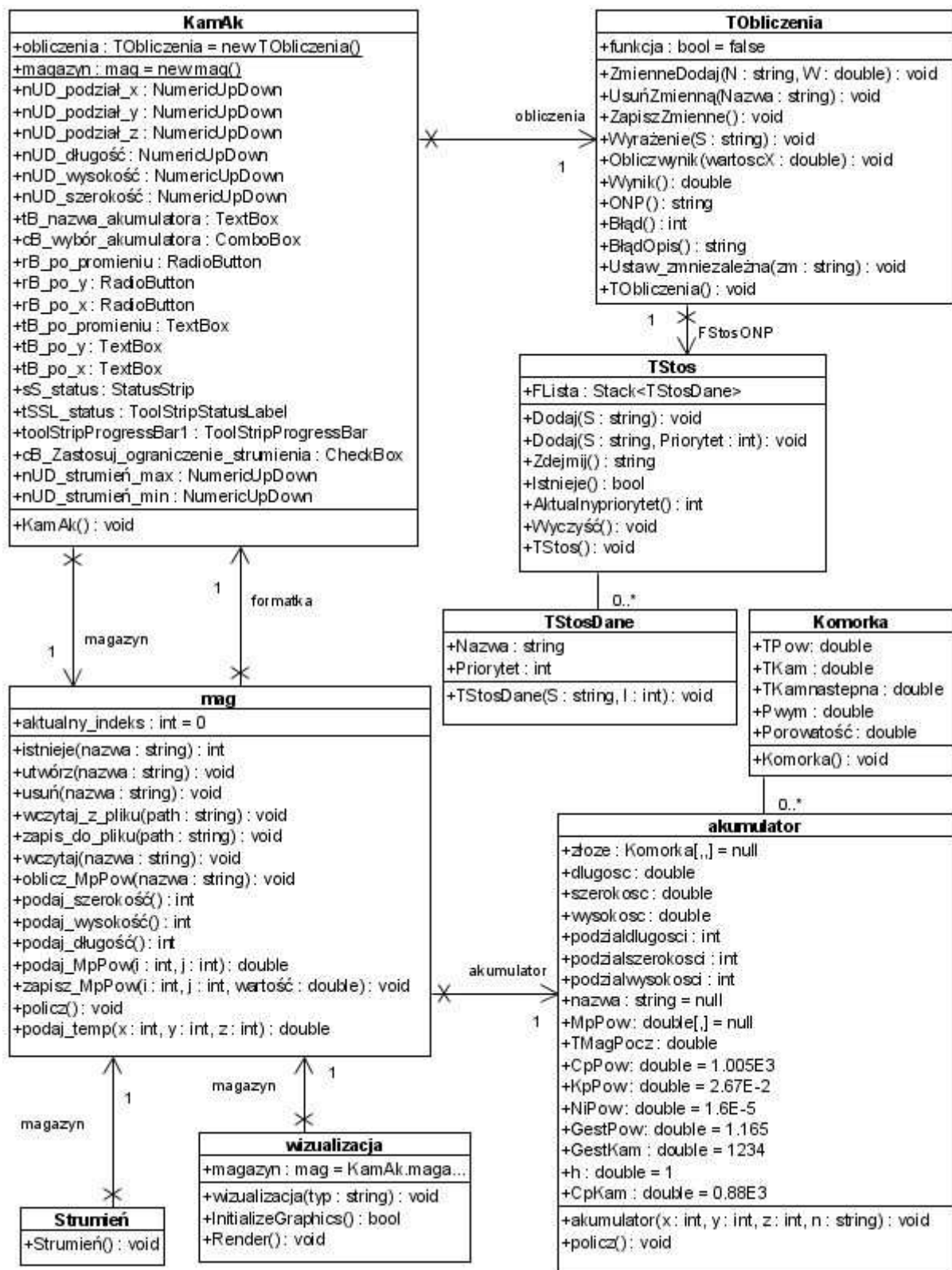
Faza projektowania aplikacji została poprzedzona przyjęciem następujących założeń, wynikających między innymi z ogólnych wymagań kierowych pod adresem systemu:

- zostanie w nim odwzorowany zarówno model probabilistyczny, jak i deterministyczny przepływu ciepła,
- integralną część aplikacji stanowić będzie moduł wizualizacyjny, wspomagający analizę danych.

Prezentowane narzędzie badawcze, a w przyszłości być może również przydatne dla praktyki, zostało zaprojektowane zgodnie z regułami inżynierii oprogramowania [1] przy wykorzystaniu języka modelowania UML 2.0. Modelowanie dziedziny problemowej zostało wykonane za pomocą programu Visual Paradigm for UML 6.4 Community Edition. Efektem tego etapu prac były diagramy przypadków użycia, klas obiektów, czynności oraz komponentów. Funkcje systemu KamAK w wersji 2.0, będące rozpoznawczymi wymaganiami użytkowników, którzy są jednocześnie wytwórcami oprogramowania zaprezentowano w postaci diagramu przypadków użycia na rys. 1.



Rys. 1. Diagram przypadków użycia  
Fig. 1. The diagram of cases of use



Rys. 2. Diagram klas – statyczna perspektywa systemu  
 Fig. 2. The diagram of the classes – the static perspective of the system

Perspektywę statyczną modelowanego systemu odwzorowano w diagramach klas [3]. Każda z klas reprezentowana jest za pomocą zestawu atrybutów i operacji, stanowiących zestaw informacji i działań. Uzyskane diagramy to również efekt wielopoziomowego modelowania trwałych danych, które zostaną posadowione w systemie zarządzania bazami danych. Ten proces był prowadzony współbieżnie z projektowaniem aplikacji i stanowił jego integralną część.

Rezultaty tego etapu modelowania przedstawiono na rys. 2. Celem poprawy czytelności wspomnianego diagramu ograniczono się do przedstawienia na nim tylko atrybutów i operacji o dostępie publicznym.

#### 4. System informatyczny do badania i wizualizacji przepływu ciepła

Faza modelowania w połączeniu z uzyskaniem końco-

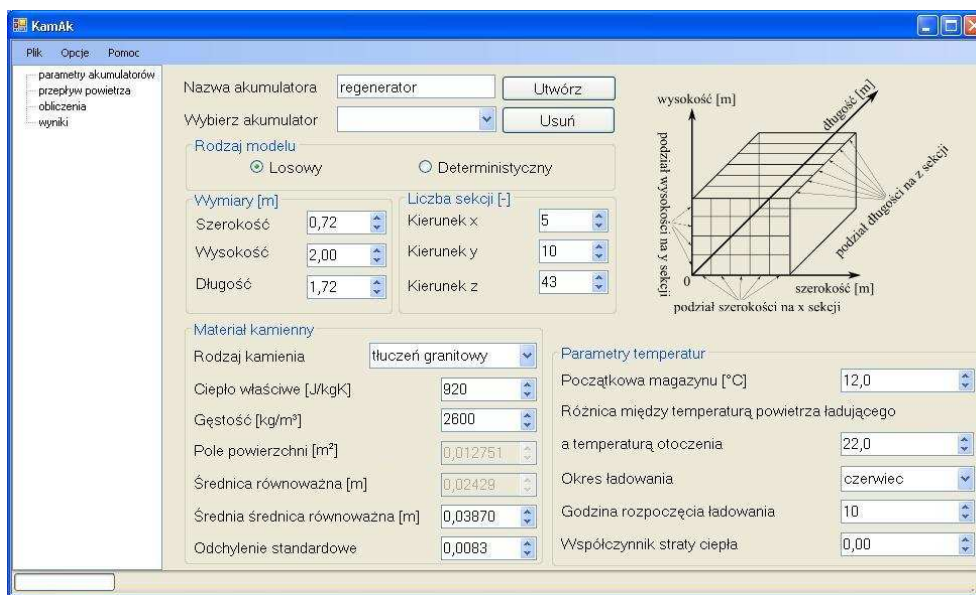
wego produktu, jakim jest wytworzona aplikacja okienkowa ukazuje, iż jest ona czymś więcej niż tylko odwzorowaniem nowego probabilistycznego modelu wymiany ciepła opisującego fazę ładowania kamiennego regeneratora. Zawiera ona również w sobie elementy, które związane są z metodą dalszych badań. Implementacja zaprojektowanego systemu została dokonana z wykorzystaniem języka C# i szeregu bibliotek dostępnych w środowisku programistycznym Visual Studio 2008 firmy Microsoft [2].

Przeprowadzenie symulacji komputerowej przepływu ciepła w kamiennym regeneratorze przy wykorzystaniu prezentowanej aplikacji wymaga uprzedniego określenia wielu parametrów charakteryzujących kamienny akumulator, przebieg procesu ładowania itd. Realizowane jest to z poziomu formularza, który staje się aktywnym bezpośrednio po uruchomieniu aplikacji lub przejście do niego jest możliwe poprzez wykorzystanie panelu nawigacyjnego zlokalizowanego po lewej stronie formularza rys. 3. Z poziomu

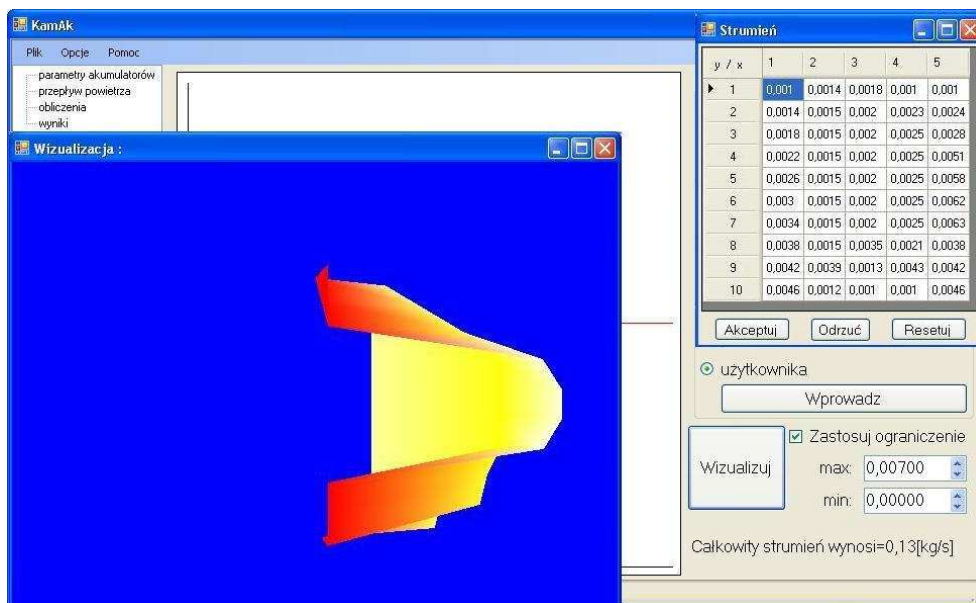
omawianego formularza wprowadza się również cechy losowe, opisujące średnicę równoważną elementów złoża, natomiast cechy losowe pola powierzchni kamienia zaszyte zostały bezpośrednio w kodzie aplikacji.

Wprowadzenie informacji, charakteryzujących nierównomierność przepływu powietrza przez złożę w trakcie fazy ładowania musi być poprzedzone podziałem regeneratora na sekcje, co jest również dokonywane w formularzu startowym. Natomiast dane opisujące bezpośrednio przepływ powietrza są wprowadzane w kolejnym formularzu dostępnym z panelu nawigacyjnego. Dopuszczono dwa warianty określenia niejednorodności przepływu płynu:

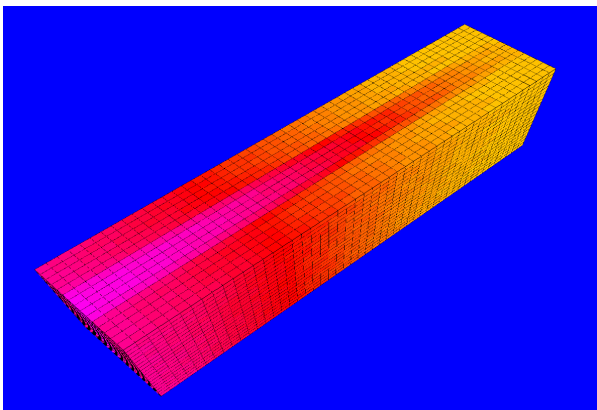
- poprzez wybór określonej funkcji z listy lub wprowadzenie odpowiedniej zależności,
- wypełnienie dwumiarowej tablicy wartościami masowego natężenia przepływu, gdzie liczba elementów tablicy jest konsekwencją podziału regeneratora.



Rys. 3. Formularz parametrów wejściowych procesu symulacji  
Fig. 3. The form of the input data of the simulation process



Rys. 4. Podformularz symulatora do określenia strumieni cząstkowych powietrza  
Fig. 4. The subform of the simulator for determining the partial air flows



Rys. 5. Wizualizacja przepływu ciepła w kamiennym akumulatorze

Fig. 5. The visualization of the heat flow in a stone regenerator

Formularz nie tylko umożliwia wprowadzenie niezbędnych informacji, ale równocześnie pozwala na wizualizację dokonanych wyborów lub wprowadzonych wartości masowego natężenia przepływu, co ilustruje rys. 4. Stwarza to możliwość oceny poprawności dokonanego wyboru, jak również pozwala eliminować błędy grube powstałe przy wprowadzaniu danych.

Kolejny w strukturze hierarchicznej formularz pozwala na przeprowadzenie obliczeń z jednoczesną wizualizacją wyników. Ten proces poprzedzony jest wyborami związanymi z określeniem liczby powtórzeń oraz kroków czasowych. Informacje te są szczególnie istotne z perspektywy symulacji prowadzonych z wykorzystaniem modelu probabilistycznego. Pod tym kątem rozbudowano również możliwości zapisu danych, które będą przedmiotem dalszych analiz statystycznych. Definiujemy tutaj wielkość fizyczną, która będzie podlegała wspomnianej analizie, sekcje, z której dane będą zbierane, oraz częstotliwości ich zapisu. Rozpoczęcie obliczeń jest równoznaczne z uruchomieniem procesu wizualizacji przepływu ciepła w kamiennym regeneratorsie (rys. 5) z perspektywy wybranej wielkości fizycznej. Przerwanie wizualizacji nie pociąga za sobą zakończenia obliczeń.

Wyniki będące efektem symulacji są prezentowane również w formie zestawień tabelarycznych i wykresów generowanych na poziomie arkusza kalkulacyjnego, do których uzyskujemy dostęp poprzez dokonanie wyboru „wyniki” w panelu nawigacyjnym.

Celem kontynuowania analiz statystycznych z wykorzystaniem innych specjalistycznych aplikacji istnieje możliwość zapisu wyników symulacji komputerowych zarówno do pliku XML, jak i do struktur relacyjnych w formie pliku .mdb. Powyższa funkcjonalność dostępna jest na poziomie menu.

## 5. Podsumowanie

1. Wytworzony system informatyczny, w którym odwołano nowy model probabilistyczny wymiany ciepła zachodzącej w fazie ładowania kamiennego akumulatora, uwzględniający dodatkowo nierównomierność przepływu powietrza, stanowi bardzo wygodne narzędzie badawcze. Szczególnie przydatnym mechanizmem, wspierającym wprowadzanie danych i analizę wyników symulacji jest ich wizualizacja.
2. Użyte technologie informatyczne pozwalają na szybką rozbudowę aplikacji, co niewątpliwie będzie miało miejsce i jej integrację z kolejnymi, powstającymi systemami informatycznymi opisującymi przepływ ciepła w kolejnych fazach pracy kamiennego akumulatora.

## 6. Literatura

- [1] Jaskiewicz A.: Inżynieria oprogramowania. Wydawnictwo Helion, Gliwice, 1997. ISBN: 83-7197-007-2.
- [2] Perry Stephen C.: CORE C#i .NET. Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2006. ISBN: 83-246-0320-4.
- [3] Wrycza S., Marcinkowski B., Wyrzykowski K.: Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych. Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2005. ISBN: 83-7361-892-9.
- [4] Maćkowiak S.: Modelowanie procesu wymiany ciepła w regeneratorsach kamiennych sektora rolniczego z uwzględnieniem losowości złoża. Praca doktorska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 2009.