

Warszawa, dn. 03.02.2023 r.

mgr inż. Eleonora Skrzypek  
Autor pracy

Streszczenie rozprawy doktorskiej nt.:

**„Ciepłno-przepływowe modelowanie warstwy ciekłego metalu na powierzchni stopionego materiału rdzenia reaktora PWR w warunkach ciężkiej awarii”**

Celem tej pracy jest poprawa bezpieczeństwa reaktorów jądrowych poprzez lepsze zrozumienie zachowania się cienkiej warstwy metalicznej na powierzchni basenu stopionego materiału rdzenia w warunkach ciężkiej awarii. Badania teoretyczne i obliczeniowe przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej dostarczają kompleksowego i wyczerpującego opisu zjawiska krzepnięcia-topnienia warstwy metalicznej oraz jej przewidywanej konwekcji wewnętrznej. Wynikiem przedstawionych badań jest propozycja lepszego opisu zachowania stopionego basenu paliwa dla scenariuszy topnienia rdzenia w elektrowni jądrowej z reaktorem lekko-wodnym dużej mocy.

W ramach analizy krzepnięcia-topnienia cel realizowany jest poprzez zbudowanie i porównanie modeli matematycznych oraz obliczeń z tzw. podejściem „0D” stosowanym w integralnych kodach do analiz ciężkich awarii reaktorów jądrowych. W pierwszej części pracy doktorskiej opracowano przybliżone rozwiązania „0D” dla stanów nieustalonych krzepnięcia-topnienia warstwy metalu na powierzchni basenu stopionego paliwa znajdującego się w dennicy zbiornika reaktora przy użyciu platformy obliczeniowej PROCOR. Wyniki są następnie porównywane w celu oceny ich skuteczności z rozwiązaniem referencyjnym, które opiera się na podejściu „1D”.

Metodologie stosowane do badania zagadnienia krzepnięcia-topnienia warstwy metalicznej opierają się zarówno na opracowaniu modeli matematycznych, jak i dodatkowo wykorzystaniu kodów obliczeniowych. Badania teoretyczne polegają na określeniu równań rządzących procesami fizycznymi zachodzącymi w cienkiej warstwie metalicznej przechodzącej przemianę fazową w różnych warunkach. Równania te są następnie analizowane pod kątem procesu krzepnięcia-topnienia i proponowane są modele matematyczne zjawisk, które poddawane są następnie testowaniu.

W zakresie zagadnienia konwekcji, z punktu widzenia badań teoretycznych, konstruowany jest układ równań bezwymiarowych opisujących ruch płynu, bilans masy i wymianę ciepła wraz z towarzyszącymi im warunkami brzegowymi dla analizowanej domeny warstwy metalicznej. Na podstawie tych równań analizowany jest reżim przepływu i specyficzne zjawiska w niej występujące. Po analizie teoretycznej następuje część badań obliczeniowych nad zjawiskiem konwekcji w cienkiej warstwie metalicznej. Niniejsze opracowanie obliczeniowe opiera się na praktycznym wykorzystaniu oprogramowania ANSYS Fluent (podejście CFD), które może być narzędziem wspomagającym ocenę ciężkich awarii w podejściu wielowymiarowym. Obliczenia wymiany ciepła za pomocą oprogramowania do komputerowej mechaniki płynów są wykonywane zarówno dla dostępnych danych eksperymentalnych (BALI-Métal), jak i zakładanego prototypowego składu materiałowego warstwy.

Dzięki teoretycznym i obliczeniowym badaniom możliwe jest lepsze modelowanie i lepsze zrozumienie konwekcji naturalnej w ciekłej warstwie metalu na powierzchni stopionego materiału paliwa. To zrozumienie staje się niezbędne, gdy pojawia się zwiększone zagrożenie efektem ogniskowania na zbiorniku ciśnieniowym reaktora (RPV), co ma kluczowe znaczenie dla oceny bezpieczeństwa reaktora. Dodatkowo w pracy przedstawiono możliwość reprezentacji wymiany ciepła za pomocą oprogramowania komputerowego do analizy numerycznej, co może stać się zaletą w przyszłej ocenie bezpieczeństwa reaktorów.

Podsumowując, lepsze zrozumienie przedstawionych zjawisk skutkuje lepszym zrozumieniem bardzo nieprawdopodobnych, ale wciąż możliwych poważnych awarii i lepszym przygotowaniem do zarządzania nimi. Ostatecznym celem jest bezpieczniejsza i bardziej niezawodna energia jądrowa.

**Słowa kluczowe: bezpieczeństwo elektrowni jądrowych, reaktory lekko-wodne, IVMR, efekt ogniskowania, ciężkie awarie, analiza ciepłno-przepływowa**

*Eleonora Skrzypek*

Podpis Doktoranta

Warszawa, dn. 03.02.2023

Eleonora Skrzypek, M.Sc., Eng.  
Autor pracy

Streszczenie rozprawy doktorskiej nt.:  
**„Thermo-hydraulic modeling of a steel metal layer on top of a corium pool in a PWR under severe accident conditions”**

The aim of this work is the improvement of the safety of nuclear reactors through a better understanding of the thin metallic layer behavior on the top of the corium pool under severe accident conditions. The theoretical and computational investigations performed in the frame of this doctoral thesis provide a comprehensive and exhaustive description of the metallic layer solidification-melting phenomenon and its anticipated internal convection. The presented studies result in a proposition of better description of the corium behavior for core melt scenarios in Nuclear Power Plant with high-power Light Water Reactor.

In the frame of solidification-melting analysis of the metallic layer, this ambitious goal involves the construction and comparison of the mathematical models and calculations with the so-called “0D” approach used in the integral severe accident codes. In the first part of the doctoral thesis, the approximate solutions are developed for the solidification-melting transients for the “0D” lower head corium pool in the PROCOR platform. They are later compared for the evaluation of their effectiveness to the reference solution, which is based on the “1D” approach.

The methodologies used for the study of the metallic layer solidification-melting topic are both based on the development of mathematical models and, additionally performance of computational calculations. The theoretical investigations involve the definition of the equations ruling the physical processes taking place in a thin metallic layer undergoing phase change under various conditions. Those equations are then analyzed for the solidification-melting process with the mathematical models of the phenomena being designed, followed by their testing.

In terms of the convection problem, from the point of theoretical study, the set of non-dimensional equations is constructed, which describe the fluid motion, mass balance, and heat transfer with associated boundary conditions in the metallic layer domain. Based on these equations, the flow regime and specific phenomena are analyzed. The theoretical study is followed by the part of the computational investigations for the convection phenomena in the thin metallic layer. This computational study is based on the practical use of the software - ANSYS Fluent (CFD approach), which can be a supporting tool for severe accident evaluations by a multidimensional approach. The heat transfer computations with fluid dynamics software are performed both for available experimental data (BALI-Métal) and the prototypical layer composition.

Through these theoretical and computational studies, better modeling and a better understanding of natural convection in a liquid layer are developed. This understanding becomes essential when an increased threat of focusing effect appears on the Reactor Pressure Vessel (RPV), which is crucial for reactor safety assessment. Additionally, the ability of heat transfer representation by numerical analysis computational software is presented, which can become an advantage to future reactor safety evaluation.

Finally, a better understanding of these phenomena results in a better understanding of the very improbable but still possible severe accidents and better preparedness for severe accident management. The ultimate goal is safer and more reliable nuclear power.

**Słowa kluczowe: Nuclear Power Plant safety, LWR, IVMR, focusing effect, severe accidents, thermal-hydraulic analysis**

*Eleonora Skrzypek*

Podpis Doktoranta