

DISS. NO. ETH - 22550

**Condensation of steam in horizontal pipes -
model development and validation**

*A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH*

Presented by:

Rita SZIJÁRTÓ

Physicist (MSc),

Budapest University of Technology and Economics

Born on 21.10.1987

Citizen of Hungary

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Horst-Michael PRASSER

Prof. Dr. Stephan LEYER

Prof. Dr. Rafael MACIÁN-JUAN

2015

Abstract

Condensation models were introduced and developed particularly for the application in the emergency cooling system of a Gen-III+ boiling water reactor. The emergency cooling system consists of slightly inclined horizontal pipes, which are immersed in a cold water tank. The pipes are connected to the reactor pressure vessel, and they are responsible for a fast depressurization of the reactor core in case of accident; furthermore, for the continuous cooling. During an accident scenario hot steam enters the pipes at the top of the reactor pressure vessel and condenses on the colder walls, then flows downwards, where the outlet of the pipe is connected to the vessel above the core level.

The condensation in horizontal pipes was investigated with both one-dimensional system codes (RELAP5) and three-dimensional computational fluid dynamics codes (ANSYS FLUENT). The performance of the RELAP5 code was not sufficient for transient condensation processes; therefore, a mechanistic model was developed and implemented. The model calculated the heat transfer coefficient in a cross section of the flow field considering local parameters in the pipe. The model assumed a stratified flow pattern in the pipe with a laminar liquid film on the upper part of the cross section and an axial turbulent flow at the bottom of the pipe.

The modified RELAP5 code was used to calculate the Invert Edward Pipe experiment, which consisted of a closed, slightly inclined horizontal pipe, resting in a cold water tank. The fast pressurization of the pipe results in a highly transient condensation process on the pipe walls. The simulation predicted well the pressure, void fraction and temperature data for different initial conditions and different locations in the condensation pipe during the transient condensation process. Furthermore, the COSMEA facility, a single tube experiment for flow morphology and heat transfer studies, was simulated with the modified RELAP5 code. The calculations reproduced the experimental temperature and condensation rate results for different initial pressure and mass flow rates.

Condensation phenomenon was analyzed using the volume of fluid multiphase method in

the computational fluid dynamics code. The volume of fluid method solves a unique set of continuity equations in the domain and models the two phases by tracking the interface between them. Four models were developed and implemented into the FLUENT solver for modeling phase change processes.

The first technique introduced a mass and energy transfer at the interface, if the temperature of the corresponding cell was different from the saturation value. The equations, through many iterations, achieved the correct boundary conditions at the interface. The second method relied on the surface renewal theory. The theory assumed that the eddies, forming on the liquid surface, are responsible for the transfer of the latent heat to the bulk liquid. Therefore, the condensation rate depends on the turbulent velocity and length scale. The third model solved the heat flux balance equation at the interface; hence, the resolution of the thermal boundary layer in the linear region was necessary. The fourth technique was derived from the phase field theory, which is a mathematical approach to calculate interface related problems.

The four models were tested on the LAOKOON facility, which analyzed direct contact condensation in a horizontal duct. The sensitivity study showed that the numerical iteration technique and the phase field model fitted the best for the experimental results. The COSMEA facility was simulated with the numerical iteration and the phase field models. The simulations captured the developing geometry of the gas-liquid interface in the horizontal pipe and the temperature distribution in the liquid film.

The computational fluid dynamics calculations were used to justify the assumptions of the heat transfer coefficient calculation implemented into the RELAP5 code. The laminar regime of the liquid film was verified at the upper part of the pipe cross section. The distribution of the heat transfer coefficient on the wall calculated with the volume of fluid multiphase method followed the smooth distribution demonstrated with the mechanistic model.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Kondensationsmodelle für die Anwendung in Notkondensatorsystemen von Gen-III+ Siedewasserreaktoren vorgestellt und entwickelt. Der Notkondensator ist ein passives Sicherheitssystem, das aus leicht gegen die Horizontale geneigten, in einem Kühlbecken liegenden U-Rohren besteht. In einer Notsituation strömt Dampf aus dem Reaktordruckbehälter in die Rohre, kondensiert an den kalten Wänden und fließt in den Reaktor zurück. Dadurch wird die Nachzerfallswärme aus dem Reaktor an das Kühlbecken abgeführt, ohne dass ein zusätzlicher Kühlmittelverlust auftritt.

Die Kondensation von Wasserdampf wurde mit dem eindimensionalen Thermohydraulikprogramm (RELAP5) und der Methode der dreidimensionalen numerischen Strömungsmechanik (ANSYS FLUENT) modelliert.

RELAP5 konnte den Kondensationsvorgang unter stark transienten Bedingungen eines als Testfall verwendeten Experiments nicht reproduzieren. Daher wurde ein verbessertes mechanistisches Modell entwickelt und in RELAP5 implementiert. Unter Berücksichtigung von lokalen Parametern berechnet dieses Modell einen Wärmeübergangskoeffizienten entsprechend der im jeweiligen Strömungsquerschnitt vorliegenden Kondensatverteilung. Hierzu wird eine stratifizierte Strömung angenommen, bei der ein laminarer Flüssigkeitsfilm im oberen Teil des Querschnitts und ein Kondensatgerinne am Boden des Rohres vorliegen. Die Nachrechnung des Testfalls dem modifizierten RELAP5 Code bestätigte eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Modell. Dabei handelt es sich um das sogenannte Inverse Edward-Pipe-Experiment, bei dem ein evakuiertes, leicht geneigtes, von kaltem Wasser umgebenes Rohr plötzlich mit einem unter Druck stehenden Dampfkessel verbunden wird. An der Innenwand des Rohrs wird dabei ein hochgradig transienter Kondensationsvorgang ausgelöst. Die Simulation lieferte eine gute Übereinstimmung des Druckverlaufs sowie des Gasgehalts und der Temperatur an verschiedenen Positionen des Rohrs für unterschiedliche Startbedingungen. Als zweiter Testfall wurden Experimente an der Rossendorfer Anlage COSMEA hinzugezogen, bei der es sich um ein Einzelrohr mit

Kühlmantel handelt, das mit Thermoelementen und einem Röntgentomographen ausgestattet ist. Die Berechnungen mit dem modifizierten RELAP5 Code zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Temperaturdaten und Kondensationsraten.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde das Kondensationsphänomen dreidimensional behandelt. Die Dynamik der Phasengrenze wurde mit Hilfe der Volume-of-Fluid (VOF)-Methode simuliert. Sie beschreibt die zwei Phasen als Kontinuum, wobei der Volumenanteil die lokal gültigen Stoffwerte bestimmt. Durch Lösung der Transportgleichung für den Volumenanteils wird die Gestalt und Ausdehnung der Zwischenphasengrenzfläche ermittelt. Für den Phasenübergang wurden vier Modelle entwickelt und in den Solver des kommerziellen CFD-Codes von FLUENT integriert.

Das erste Modell beschreibt den Energie und den Massentransport an der Grenzfläche als Funktion von der Abweichung der Temperatur der betreffenden Zelle von der Sättigungstemperatur. Über einen Relaxationsansatz werden iterativ korrekte Randbedingungen an der Phasengrenzfläche erreicht. Das zweite Modell basiert auf der Surface Renewal Theory, die davon ausgeht, dass die turbulente Strömung der Flüssigphase für den Wärmetransport an die Phasengrenzfläche verantwortlich ist. Dadurch definiert die Theorie eine Kondensationsrate, die vom Massstab der turbulenten Strukturen abhängig ist. Das dritte Modell löst die Wärmeleitungsgleichung an der Grenzfläche. Hierzu muss die thermische Grenzschicht im linearen Bereich aufgelöst werden. Das vierte Modell leitet sich von der Phasenfeldmethode ab, einem thermodynamischen Ansatz für Phasenübergänge oberflächenbezogene an einer freien Oberfläche.

Die vier Modelle wurden anhand von Daten überprüft, die an der Versuchsanlage LAKOON gewonnen wurden. Dabei handelt es sich um Kondensationsexperimente an einer freien Oberfläche in einem horizontalen Kanal. Eine Sensitivitätsanalyse hat den Beweis erbracht, dass der iterative Relaxationsansatz und die Phasenfeldmethode die experimentellen Resultaten am besten wiedergeben. Kondensationsexperimente in einer Rohrleitung, der Rossendorfer COSMEA Anlage, wurden ebenfalls mit diesen beiden Methoden nachgerechnet. Es gelang die beobachteten Strömungsmuster im Rohr sowie die Temperaturverteilung im Fluid und an der Wand in den Grenzen der Genauigkeit der Messung zu reproduzieren. Die Ansätze zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten, die in RELAP5 implementiert wurden, konnten mittels dreidimensionaler Simulationen mit dem getesteten CFD-Modell bestätigt werden. Die Annahme eines laminaren Kondensatfilms im oberen Teil des Rohrquerschnitts wurde verifiziert. Die mit der VOF-Methode berechnete Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten über den Umfang der Rohrleitung ist in guter Übereinstimmung mit dem vereinfachten mechanistischen Modell.

Összefoglalás

A jelen doktori dolgozat témája kondenzációs modellek fejlesztése, elsősorban a harmadik generációs forralóvizes reaktor passzív üzemzavari hűtőrendszerének vizsgálatára. Az üzemzavari hűtőrendszer a vízszintessel kis szöget bezáró szárakkal rendelkező, U-alakú csövekből áll, melyek hideg vizes hőcserélő medencébe merülnek. A csövek a reaktortartályhoz csatlakoznak két ponton, így üzemzavar esetén a tartályban keletkezett vízgőz a kondenzációs csövekbe áramlik. A gőz lecsapódik a hőcserélők falán, majd a keletkezett víz visszaáramlik a tartályba, így biztosítva folyamatosan a zónában keletkező remanens hő elvonását.

A folyamat modellezését két megközelítésben, egydimenziós rendszerkód segítségével, valamint háromdimenziós CFD kód segítségével végeztem el. A RELAP5 rendszerkód szolgált a kondenzációs hőátadás számolására vízszintes csövek esetén. A kód alkalmatlannak bizonyult tranziens kondenzációs folyamatok számítására, ezért mechanisztikus modellt fejlesztettem és ültettem be a RELAP5 programba. A modell kiszámítja a kondenzációs hőátadási tényezőt a cső egy keresztmetszetében, figyelembe véve a lokális áramlási paramétereket. A modell három áramlási zónát különböztet meg: az első a lamináris film a cső felső részén, ahol a gőz lecsapódik a cső falára, a második a cső alján áramló tengelyirányú turbulens víz, míg a cső közepén helyezkedik el a szintén tengelyirányban áramló vízgőz.

A módosított RELAP5 program tesztelése az Invert Edwards Pipe (INVEP) kísérleti berendezés számításával történt. Az INVEP berendezés egyik végén zárt, a vízszinteshez képest kis szögben elhelyezkedő hőátadó csőből állt, mely egy hideg vizes tartályba merült. A cső másik vége egy nagynyomású, vízgőzzel töltött tartályhoz csatlakozott. A kísérlet során erős tranziens jellegű kondenzáció ment végbe. A módosított RELAP5 program helyesen számította a lokális nyomást, a hőmérsékletet és a térfogati gőztartalmat a tranziens lezajlása alatt, különböző kezdeti feltételek mellett. A kód, ezek mellett, szintén helyesen számította a mért hőmérsékleteket és a kondenzáció mértékét a COSMEA berendezésen. A

COSMEA berendezés egy vízszintes csőből áll, melyet hőátadás és áramlástanai kísérletek elvégzésére terveztek kondenzációs folyamatok mérésére.

A kondenzáció modellezése, az egydimenziós technika mellett háromdimenziós CFD kóddal is történt. A volume-of-fluid (VOF) többfázisú áramlási technikát alkalmaztam az ANSYS FLUENT program keretében. A VOF módszer a két fázis közötti határfelület követésén alapul. A módszer a két fázis közös megmaradási egyenletrendszerével dolgozik, mely a gőztartalom megmaradási egyenletével egészül ki. Az adott cella anyagi paraméterei a gőztartalom helyi értékén alapulnak. A dolgozat keretében négy kondenzációs modellt fejlesztettem, melyek segítségével fázisátalakulás számítható a VOF többfázisú technikával.

Az első modell a numerikus iterációs technika, mely tömeg- és hőátadást számol a határfelületi cellákban, amennyiben az adott cella hőmérséklete nem egyenlő a víz adott nyomásnak megfelelő forráspontjával. A második technika alapja, hogy a kondenzáció során leadott hő elvezetésének sebességét a víz turbulenciája határozza meg, így a kondenzáció mértéke a víz turbulenciájától függ. A harmadik modell a hőfluxus kontinuitási egyenletre épül a két fázis közötti felületen. Az egyenlet a hőmérséklet gradiensétől függ, ezért a lineáris termikus határréteg nagy pontosságú numerikus modellezése szükséges a számítások során. A negyedik technika a fázismező technikán alapul, mely egy matematikai módszer felületekkel kapcsolatos problémák megoldására.

A négy modell tesztelése a LAOKOON kísérleti berendezés számításával történt. A LAOKOON berendezés felületi kondenzáció mérésére alkalmas, melyben víz és gőz rétegesen áramlik egy vízszintes vezetékben. A vizsgálat kimutatta, hogy a numerikus iterációs technika és a fázismező modell adta a legjobb közelítést a kísérleti eredményekkel való összehasonlítás után. A COSMEA berendezés számítása e két modellel történt, melyek sikeresen visszaadták a csőben kialakuló áramlási képet, valamint a hőátadási tényező- és a hőmérséklet-eloszlást a cső belső falán.

A CFD számítások alkalmasak arra, hogy a RELAP5 kódhoz hozzáadott mechanisztikus hőátadási tényező számításakor figyelembe vett feltételezéseket és szempontokat igazolják. A mechanisztikus modell által feltételezett áramlási kép, a cső felső részén található áramlás lamináris, valamint a tengelyirányú áramlás turbulens jellege bizonyított. A hőátadási tényező falfelületi eloszlása a mechanisztikus modell valamint a CFD számítás alapján szintén azonos jelleget mutat.