



Doctoral Thesis

Numerical and experimental study of large steam-air bubbles injected in a water pool

Author(s):

Meier, Markus

Publication Date:

1999

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002059781> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 13091

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF LARGE
STEAM-AIR BUBBLES INJECTED IN A WATER POOL**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

MARKUS MEIER

Dipl. Masch.-Ing. ETH

born on February 1, 1968

citizen of Winterthur (ZH), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. George Yadigaroglu, Zurich, examiner

Prof. Stéphane Zaleski, Paris, co-examiner

Dr. Brian L. Smith, Villigen, co-examiner

1999

Abstract

In several concepts of future Boiling Water Reactors, emergency cooling of the reactor and of the containment is provided by passive cooling systems, without any pumps. In these systems, complex phenomena such as natural circulation and condensation processes in the presence of non-condensables are important. These phenomena are only insufficiently understood.

In the ESBWR design (European Simplified Boiling Water Reactor), hot mixtures of steam and nitrogen forming after an accident are blown down into a pool of water. In the simplest design, a downward-facing open pipe is used for the injection. At its end, large gas bubbles form, break up, and rise in the water. The complete condensation of the steam during this process is important for the long-term operation of the system. However, there are hardly any experimental results for this process, and existing computer models are insufficient. We have developed a computer simulation of the hydrodynamics of the process and carried out an experiment.

For the numerical simulation, we programmed a special finite-difference method for the solution of the incompressible flow equations for the joint motion of gas and liquid. The moving boundary between the liquid and the gas is tracked directly with an improved VOF method (Volume Of Fluid) that approximates it by a straight line in each cell of the discretisation grid. Otherwise, we use a classical first- and second-order MAC method (Marker And Cell) in 2D-cylindrical coordinates. For surface tension, we developed a new method, which produces partly better results than known methods, such as the CSF method (Continuum Surface Force). Furthermore, we coupled the model to a 1D pipe model, which simulates pressure and flow oscillations in the feed-pipe.

Several test cases, for example, the dam-break problem, could be simulated with the model. We could get realistic results also for flows with significant surface tension, such as rising bubbles. For the given problem of gas injection into a pool of water, our simulations are fairly realistic; limits are set by the 2D-cylindrical coordinates and the insufficient grid resolution or computer power. Moreover, we gave up attempts to include condensation of the steam in the simulation, since the foundations (empirical correlations, experimental data for comparison) are largely missing. The present model therefore assumes a single-component, isothermal gas.

In a second phase of the project, we have built and run an experiment, where up to 40 l/s of steam and 24 l/s of air were blown through a tube of 5 cm diameter into an open tank filled with about 1000 l of water at up to 92°C. For observation, we mainly used normal and high-speed video cameras, complemented by high-frequency pressure-measurement in the tube, and resistance probes measuring the void fraction around the tube end.

The process of gas injection turned out to be very erratic and irregular. However, it essentially follows a periodical pattern of bubble formation at the nozzle, detachment from the nozzle and upward acceleration, followed by break-up into many small bubbles. In the feed-pipe, we observed strong pressure and velocity oscillations. Special tests showed that these are resonance oscillations that depend on the length of the feed-pipe, and considerably influence the bubble formation.

The condensation of the steam cannot be measured directly. However, by estimating the bubble volumes on video frames, we could indirectly obtain some results. With regard to such volume estimates, we have introduced two volumetric flow rates (the in-coming

gas-flow and the gas-flow after maximum condensation) as test parameters. Volume estimates were only possible for the point of bubble detachment from the nozzle; these estimates show that a large fraction of the steam already condenses before this point. Furthermore, we found an approximate correlation for the height above the nozzle where the bubble break-up is complete. Above this point, maximum condensation is virtually guaranteed.

Kurzfassung

In verschiedenen Konzepten für zukünftige Siedewasserreaktoren wird die Notkühlung des Reaktors und des Containments durch passive Kühlsysteme, die ohne Pumpen auskommen, sichergestellt. In diesen Systemen sind jedoch komplexe Vorgänge wie Naturumlauf und Kondensationsvorgänge von Gemischen mit nicht-kondensierbaren Gasen, über die genauere Kenntnisse fehlen, bedeutsam.

Im ESBWR-Entwurf (European Simplified Boiling Water Reactor) fallen in einem Störfall heisse Dampf-Stickstoff-Gemische an, die in ein Kühlwasserbecken abgeblasen werden. Dazu wird im einfachsten Fall ein nach unten offenes Rohr eingesetzt. An dessen Mündung bilden sich grosse Gasblasen, die im Wasser auseinanderbrechen und aufsteigen. Die dabei auftretende, vollständige Kondensation des Dampfes ist wichtig für das langfristige Funktionieren des Systems. Es gibt aber kaum experimentelle Resultate über diesen Prozess, und existierende Computermodelle sind unzureichend. Wir entwickelten eine Computersimulation der Hydrodynamik des Prozesses und führten ein entsprechendes Experiment durch.

Für die numerische Simulation programmierten wir eine spezielle Finite-Differenzen-Methode zur Lösung der inkompressiblen Strömungsgleichungen für die gemeinsame Bewegung von Gas und Flüssigkeit. Die sich bewegende Grenze zwischen Flüssigkeit und Gas wird durch eine verbesserte VOF-Methode (Volume Of Fluid) direkt verfolgt und durch eine gerade Linie in jeder Zelle des Diskretisierungsgitters angenähert. Im übrigen verwenden wir eine klassische MAC-Lösungsmethode (Marker And Cell) erster und zweiter Ordnung in 2D-zylindrischen Koordinaten. Für die Oberflächenspannung entwickelten wir eine neue Methode, welche teilweise bessere Ergebnisse liefert als bekannte Methoden, wie etwa die CSF-Methode (Continuum Surface Force). Zudem koppelten wir das Modell mit einem 1D-Rohrmodell, welches Druck- und Strömungsschwingungen im Zuleitungsrohr simuliert.

Verschiedene Testfälle, wie beispielsweise das Dammbbruch-Problem, können mit dem Modell simuliert werden. Auch für Stömungen mit wesentlicher Oberflächenspannung, wie etwa für aufsteigende Blasen, konnten wir realistische Ergebnisse erzielen. Das gegebene Problem der Gas-Einblasung in ein Wasserbad konnten wir teilweise realistisch simulieren. Grenzen sind jedoch durch die 2D-zylindrischen Koordinaten und durch die mangelnde Gitterauflösung beziehungsweise Computerleistung gesetzt. Auch haben wir Versuche aufgegeben, die Kondensation des Dampfes ebenfalls zu simulieren, weil die Grundlagen (empirische Korrelationen, experimentelle Daten zum Vergleich) dazu weitgehend fehlen. Das gegenwärtige Modell nimmt deshalb ein ein-komponentiges, isothermes Gas an.

In einer zweiten Phase des Projekts haben wir ein Experiment aufgebaut und betrieben. Darin wurden bis zu 40 l/s Dampf und 24 l/s Luft durch ein Rohr mit 5 cm Durchmesser in einen offenen Tank geblasen, der mit rund 1000 l Wasser von bis zu 92°C gefüllt war. Zur Beobachtung setzten wir hauptsächlich normale und Hochgeschwindigkeits-Videokameras ein, ergänzt durch eine Hochfrequenz-Druckmessung im Rohr, und Widerstandssonden, die den Blasenanteil nahe der Mündung messen.

Der Prozess der Gas-Einblasung erwies sich als sehr erratisch und unregelmässig. Im wesentlichen folgt er aber einem periodischen Grundmuster von Blasenbildung an der Mündung, Ablösung von der Mündung und Beschleunigung der Blase nach oben, und abschliessendes Auseinanderbrechen in viele kleine Blasen. Im Zuleitungsrohr beobachteten

wir starke Druck- und Geschwindigkeitsschwingungen. Spezielle Tests zeigten, dass dies Resonanzschwingungen sind, die von der Rohrlänge abhängen, und den Einblasungsprozess massgeblich beeinflussen.

Die Kondensation des Dampfes kann nicht direkt gemessen werden. Durch Schätzung der Blasenvolumen auf Grund von Videoaufnahmen konnten wir aber gewisse Aufschlüsse gewinnen. Im Hinblick auf solche Volumenschätzungen haben wir zwei Volumenströme (der Gaszufluss und der Gasstrom nach maximaler Kondensation) als Testparameter eingeführt. Volumenschätzungen waren nur möglich für den Zeitpunkt der Blasenablösung von der Mündung; diese zeigen, dass ein grosser Teil der Kondensation bereits vor diesem Zeitpunkt auftritt. Weiter fanden wir eine ungefähre Korrelation für die Höhe über der Mündung, wo die Blase vollständig auseinandergebrochen ist. Oberhalb dieses Punktes ist die maximale Kondensation praktisch sichergestellt.