

DISS ETH. Nr. 11798

**Transient Analysis for a Complex, Gravitational
Flashing Driven Natural Circulation System**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF
TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Zhiwei Zhou

Bachelor of Science, Tsinghua University, Beijing
Master and PhD of Engineering, Tsinghua University, Beijing
born September 11, 1957
citizen of People's Republic of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. G. Yadigaroglu, examiner
PD. Dr. J. Halin, co-examiner

1996

ABSTRACT

The GEYSER represents a new approach to a small to medium size light water nuclear district heating reactor system of high inherent safety. The whole system is designed to be operated in a fully passive way excluding completely human influence on both normal and safety related processes. Low power density, natural circulation, burnable poison and boron concentration power control, large inventory of water and low pressure operation ensure the inherent safety of this special type of pool reactor. The safety goal of preventing radioactive material from releasing to the surroundings in any incidents is achievable, so that the reactor can be built near urban residential districts. The transient analysis of this natural circulation system plays a key role in the investigation of the operational robustness of the GEYSER heating reactor. The present study is initiated for getting better understanding of slow flow transients in such a flashing driven natural circulation system.

The existing applicable lumped parameter models for transient two-phase flow are based on single system pressure assumption. This assumption on one side results in largely simplified simulation models, but on the other side makes the simplified models unable to describe the gravity-induced flashing effect which is important in the coolant loops of the GEYSER heating reactor. Obviously, classical lumped parameter models can not be applied to the analysis of its slow thermal-hydraulic transient behavior. The present study has established a new lumped parameter model from one-dimensional homogeneous equilibrium two-phase flow conservation equations. The main progress of the present study is the extension of the capability of the classical lumped parameter models to fulfil the special needs for analyzing the transient behavior of two-phase flow driven by gravity-induced flashing. This new lumped parameter model neglects the dynamic response of pressure wave propagation during the transient, but considers the pressure reduction along the two-phase region in which gravitational pressure drop is assumed dominant. Therefore, the gravity-induced flashing effect can be reasonably approximated.

For the primary system, a volumetric velocity equation in the two-phase region is obtained by combining the mass and energy equations. The volumetric velocity equation can be integrated independently with the help of imposed pressure drop distribution profiles along the two-phase region. The numerical algorithm (PIE)²(CI), the combination of the

hybrid PEPEC algorithm and the Newton-Raphson iteration method, is adopted to integrate the derived ordinary differential equations and to give the transient solution for the natural circulation loops in the primary system.

Boiling in the secondary loop has contributions by both heat flux and gravity-induced flashing. Thus, the model for the secondary system is closer to the classical channel integral model except for the imposed pressure drop profile describing the effect of the gravity-induced flashing. The secondary system is solved by the well known differential-algebraic equation solver DASSL which automatically controls computation errors bounded to the imposed relative and absolute tolerances.

The established mathematical model for the primary system of the GEYSER heating reactor has been numerically tested for a single-loop and a two-thermally-coupled, natural-circulation-loop systems for a number of pre-defined transients. The transient trends have been assessed as being qualitatively correct and consistent with the imposed triggering events. The models for the primary system and the secondary system are then used together to simulate the transient behavior of the entire system. The results from the present model indicate that the GEYSER heating reactor can sustain the heating power load change in a quite wide region. The transient response of the system shows favorable characteristics.

The present study has produced positive results in relation to the study of slow transients of the rather complex GEYSER natural circulation system. These could be useful in view of any further development of the GEYSER heating reactor. Thus, the goal of this research work has been achieved.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Begriff "GEYSER" bezeichnet ein neues Konzept für kleine bis mittelgrosse, regionale Heizreaktoren mit inhärenten Sicherheitsmechanismen. Solche Systeme sind durch eine "passive" Arbeitsweise gekennzeichnet, d.h., menschliche Eingriffe sind weder im Normalbetrieb noch bei Störfällen notwendig. Dieses Betriebsverhalten beruht auf niedriger Leistungsdichte, Naturzirkulation, abbrennbares Reaktorgift, Leistungssteuerung über den Borgehalt des Primärkreislaufes und schliesslich auf einem grossen Wasserinventar. Die Forderung, dass radioaktives Material unter keinen Umständen in die Umwelt gelangen darf, ist erfüllbar, so dass solche Reaktoren bedenkenlos in Siedlungsgebieten aufgestellt werden können. Die Analyse der Transienten spielt eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung des Betriebsverhaltens des GEYSER-Heizreaktors. Die vorliegende Untersuchung soll zu einem besseren Verständnis der langsamen Strömungstransienten in diesem von Flashing angetriebenen Naturzirkulationssystem beitragen.

Die existierenden *lumped parameter*-Modelle für transiente Zweiphasenströmung verwenden einen einheitlichen Systemdruck. Dies führt einerseits zu einer weitgehenden Vereinfachung der Simulationsmodelle, andererseits aber macht sie die Beschreibung des gravitationsbedingten Flashings unmöglich, eines Phänomens also, welches im Kühlkreislauf des GEYSER-Heizreaktors eine zentrale Rolle spielt. Offensichtlich können klassische *lumped parameter*-Modelle nicht zur Analyse der betreffenden thermohydraulischen Transienten herangezogen werden. In der vorliegenden Arbeit ist ein neues *lumped parameter*-Modell entwickelt worden, welches auf den Erhaltungssätzen für eindimensionale Gleich-gewichts-Zweiphasenströmung beruht. Der dadurch gegenüber klassischen *lumped parameter*-Modellen erzielte Fortschritt besteht im wesentlichen in der Erweiterung des Anwendungsbereiches auf die Transientenanalyse der gravitativ angetriebenen Zweiphasenströmung. Das neue *lumped parameter*-Modell vernachlässigt die dynamische Antwort der Druckwellenausbreitung während der Transienten, berücksichtigt jedoch die Veränderlichkeit des Druckes im Zweiphasengebiet, wo der gravitative Druckabfall als dominant angesehen wird. Auf diese Art kann der gravitationsbedingte Flashingeffekt in vernünftiger Weise abgeschätzt werden.

Für das Zweiphasengebiet des Primärkreislaufes wird aus den Bilanzgleichungen für

Masse und Energie eine volumetrische Geschwindigkeitsgleichung abgeleitet. Diese Gleichung kann unter Vorgabe von Druckabfallprofilen längs des Zweiphasengebietes integriert werden. Der numerische Algorithmus $(PIE)^2(CI)$, d.h., die Kombination des hybriden PEPEC-Algorithmus mit der Newton-Raphson-Iterationsmethode, wird zur Integration der gewöhnlichen Differentialgleichungen benutzt und liefert so die Lösung für die Naturzirkulation im Primärkreislauf.

Zum Sieden im Sekundärkreislauf tragen sowohl der Wärmefluss als auch das gravitationsbedingte Flashing bei. Dadurch befindet sich das Modell für den Sekundärkreislauf näher beim klassischen Kanalintegral-Modell, wenn man von der Vorgabe der Druckabfallprofile absieht. Die Lösung für den Sekundärkreislauf wird mit Hilfe des bekannten Softwarepaketes "DASSL" ermittelt, welches die Abbrechfehler automatisch auf vorgebbare relative und absolute Toleranzwerte begrenzt. Das für den Primärkreislauf des GEYSER-Heizreaktors aufgestellte mathematische Modell wurde numerisch für einen Einzelkreislauf und zwei thermisch gekoppelte Naturzirkulationskreisläufe getestet, und zwar jeweils für eine Reihe vordefinierter Transienten. Das Transientenverhalten wird als qualitativ korrekt und mit den vorgegebenen Auslöseereignissen konsistent bewertet. Die Modelle für den Primär- und den Sekundärkreislauf zusammengenommen ermöglichen dann die Simulation des transienten Verhaltens des Gesamtsystems. Die Resultate lassen den Schluss zu, dass der GEYSER-Heizreaktor sich über einen grossen Bereich hinweg robust gegenüber Leistungsänderungen verhält. Die transiente Antwort des Systems weist günstige Eigenschaften auf.

Aus der vorliegenden Untersuchung lassen sich bis zu einem gewissen Grade günstige Perspektiven für eine Weiterentwicklung des GEYSER-Heizreaktors ableiten, insbesondere was die langsamen Transienten dieses komplexen Naturzirkulationssystems betrifft. Das Ziel dieser Forschungsarbeit wurde erreicht.