

Fouling of Structured Surfaces during Pool Boiling of Aqueous Solutions

A Dissertation accepted by the Faculty of
Energy Technology, Process Engineering and Biological Engineering of the
University of Stuttgart

in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering Sciences (Dr.-Ing.)

by
Mohamed Esawy, B. Sc., M. Sc.
born in El-Sharkia, Egypt

*Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering
University of Stuttgart, Germany
September 2011*

Supervisor : Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen
Co-Referee : Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Date of Oral Examination: 30. September, 2011

ABSTRACT

Bubble characteristics in terms of density, size, frequency and motion are key factors that contribute to the superiority of nucleate pool boiling over the other modes of heat transfer. Nevertheless, if heat transfer occurs in an environment which is prone to fouling, the very same parameters may lead to accelerated deposit formation due to concentration effects beneath the growing bubbles. This has led heat exchanger designers frequently to maintain the surface temperature below the boiling point if fouling occurs, e.g. in thermal seawater desalination plants.

The present study investigates the crystallization fouling of various structured surfaces during nucleate pool boiling of CaSO_4 solutions to shed light into their fouling behaviour compared with that of plain surfaces for the same operating conditions. As for the experimental part, a comprehensive set of clean and fouling experiments was performed rigorously. The structured tubes included low finned tubes of different fin densities, heights and materials and re-entrant cavity Turbo-B tube types.

The fouling experiments were carried out at atmospheric pressure for different heat fluxes ranging from 100 to 300 kW/m^2 and CaSO_4 concentrations of 1.2 and 1.6 g/L. For the sake of comparison, similar runs were performed on plain stainless steel and copper tubes.

Overall for the finned tubes, the experimental results showed a significant reduction of fouling resistances of up to 95% compared to those of the stainless steel and copper plain tubes. In addition, the scale formation that occurred on finned tubes was primarily a scattered and thin crystalline layer which differs significantly from those of plain tubes which suffered from a thick and homogenous layer of deposit with strong adhesion. Higher fin densities and lower fin heights always led to better antifouling performance for all investigated finned tubes. It was also shown that the surface material strongly affects the scale formation of finned tubes i.e. the Cu-Ni finned tubes showed a significant reduction in fouling resistance of up to 75% compared with the Cu finned tubes at high heat fluxes.

The best antifouling behaviour was obtained for the re-entrant cavity Turbo-B tube type. It showed a reduction of 83% and 27% in fouling resistance compared with the 19 fpi finned tube and the 40 fpi finned tubes, respectively. As for deposit structure, it was only a frail and thin layer which occurred solely on the outside surface of the Turbo-B tube and there was no deposition inside the cavities.

In the theoretical study, two phenomenological models have been developed for clean heat transfer and fouling due to CaSO_4 deposition on structured tubes. The fouling model can

Abstract

predict the supersaturation in the microlayer beneath the bubbles as a function of structure geometry. The fouling resistances predicted from the model were compared with the experimental data, and good quantitative and qualitative agreement was achieved.

Finally, a numerical model was developed to simulate the effect of fouling deposits on the thermal performance of finned tubes during pool boiling in terms of fin temperature profile and thermal efficiency. The model underlines important features of fins such as their unexpectedly increased efficiency when fouling occurs. As numerically explained, this is related to the improved temperature uniformity in the fin in the event of fouling.

KURZFASSUNG

Die charakteristischen Kenngrößen der Blasenbildung in Bezug auf Dichte, Größe, Häufigkeit und Bewegung sind Schlüsselfaktoren, die zur Überlegenheit des Blasensiedens bei der Wärmeübertragung beitragen. Andererseits können dieselben Parameter aufgrund der Konzentrationseffekte unterhalb der größer werdenden Blasen zur Beschleunigung der Ablagerungsbildung führen, wenn Wärmeübertragung in einer Umgebung auftritt die für Fouling anfällig ist. Für Prozesse in denen Fouling auftritt, wie z.B. bei der Meerwasserentsalzung, wird daher bei der Auslegung von Wärmeübertragern die Oberflächentemperatur unter dem Siedepunkt gehalten.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Kristallisationsfouling an unterschiedlich strukturierten Oberflächen beim Blasensieden von CaSO_4 -Lösungen. Über einen Vergleich mit glatten Oberflächen unter denselben Betriebsbedingungen werden die Fouling-Eigenschaften dieser strukturierten Oberflächen quantifiziert und analysiert. Für den experimentellen Teil der Arbeit wurde eine umfassende Reihe von Versuchen mit destilliertem und CaSO_4 -haltigem Wasser durchgeführt. Die strukturierten Rohre sind niederberippt, mit unterschiedlicher Dichte, Höhe und Materialien der Rippen. Zudem wurden Turbo-B Rohrtypen mit hintschnittenen Strukturen untersucht.

Die Fouling-Experimente wurden unter Atmosphärendruck mit Wärmeströmen im Bereich von 100 kW/m^2 bis 300 kW/m^2 und mit CaSO_4 -Konzentrationen von $1,2 \text{ g/l}$ bis $1,6 \text{ g/l}$ durchgeführt.

Überraschenderweise zeigten die experimentellen Ergebnisse für die Rippenrohre, im Vergleich zu den glatten Edelstahl- und Kupferrohren, eine deutliche Reduzierung des Verschmutzungswiderstandes von bis zu 95%. Visuelle Beobachtungen zeigten, dass sich die Ablagerungsbildung an Rippenrohren deutlich von der an glatten Rohren unterscheidet. An glatten Rohren bildete sich eine dicke und homogene Ablagerungsschicht mit starker Anhaftung. Im Gegensatz dazu findet man an den Rippenrohren lediglich eine dünne kristalline Schicht. Diese Ergebnisse sind für die Auslegung und für den Betrieb von Dampferzeugern und Konzentratoren von enormer Bedeutung.

Bei den untersuchten Rippenrohren führten höhere Rippendichten und geringere Rippenhöhen immer zu besseren Antifouling-Eigenschaften. Es wurde auch gezeigt, dass das Oberflächenmaterial bei hohen Wärmeströmen die Ablagerungsbildung an Rippenrohren beeinflusst. Als Beispiel seien hier die Cu-Ni-Rippenrohre zu nennen. Diese zeigten, im

Vergleich mit den untersuchten Kupfer-Rippenrohren, eine bis zu 75 %-ige Reduktion des Verschmutzungswiderstandes.

Das beste Antifouling-Ergebnis konnte mit einem Turbo-B Rohr mit hinterschnittener Struktur erzielt werden. Im Vergleich zu Rippenrohren ergab sich hierfür eine Reduktion des Verschmutzungswiderstands von 83 % (19 Rippen pro Inch) und 27 % (40 Rippen pro Inch). An der äußeren Oberfläche des Turbo-B-Rohres lagerte sich nur eine schwache, dünne Schicht ab. Innerhalb der hinterschnittenen Struktur war keine Ablagerung erkennbar.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit wurden zwei phänomenologische Modelle entwickelt. Ein Modell bildet den Wärmeübergang mit destilliertem Wasser ab und das andere den Fouling-Prozess durch CaSO_4 -Ablagerung auf strukturierten Rohren. Das Fouling-Modell gibt die Übersättigung in der Mikroschicht unterhalb der Blasen als Funktion der Struktur-Geometrie wieder. Der mit Hilfe des Modells berechnete Verschmutzungswiderstand wurde mit den experimentellen Werten verglichen. Es ergab sich eine qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmung.

Schließlich wurde ein numerisches Modell entwickelt, um die Fouling-Wirkung auf die thermische Leistung der Rippenrohre zu simulieren. Dies geschieht in Abhängigkeit des Rippentemperaturprofils und des thermischen Wirkungsgrads. Das Modell unterstreicht wichtige Merkmale der Rippen, wie zum Beispiel ihre unerwartet erhöhte Effizienz beim Auftreten von Ablagerungen. Es wird numerisch gezeigt, dass dies durch die verbesserte Temperaturhomogenität der Rippen bewirkt wird.

TABLE OF CONTENTS

| | |
|--|----|
| ABSTRACT | 1 |
| KURZFASSUNG..... | 1 |
| ACKNOWLEDGEMENTS..... | 1 |
| TABLE OF CONTENTS..... | 1 |
| NOMENCLATURES..... | 1 |
| CHAPTER 1: INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Fouling of heat transfer surfaces | 1 |
| 1.2 Fouling of heat exchangers during pool boiling in industry | 2 |
| 1.3 Application of structured surfaces for boiling heat transfer..... | 5 |
| 1.4 Statement of work and research objectives..... | 7 |
| 1.5 Scope of present study..... | 7 |
| CHAPTER 2: LITERATURE REVIEW..... | 10 |
| 2.1 Pool boiling | 10 |
| 2.1.1 Mechanisms of pool boiling..... | 10 |
| 2.1.2 Nucleate pool boiling models for plain tubes..... | 12 |
| 2.2 Enhancement of nucleate pool boiling | 16 |
| 2.2.1 Boiling enhancement techniques..... | 16 |
| 2.2.2 Structured surfaces | 17 |
| 2.3 Nucleate boiling mechanisms on structured surfaces | 18 |
| 2.4 Fouling of plain surfaces during pool boiling | 19 |
| 2.5 Fouling of structured surfaces during pool boiling | 21 |
| CHAPTER 3: EXPERIMENTAL SET-UP | 23 |
| 3.1 Experimental set-up..... | 23 |
| 3.2 Test tubes..... | 26 |
| 3.3 Preparation of CaSO ₄ solution | 29 |
| 3.4 Experimental procedure and data reduction | 29 |
| 3.5 Experimental error analysis..... | 32 |
| CHAPTER 4: EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION | 34 |
| 4.1 Plain tubes | 34 |
| 4.1.1 Clean heat transfer coefficient..... | 34 |
| 4.1.1.1 Distilled water | 34 |
| 4.1.1.2 CaSO ₄ solution | 35 |
| 4.1.1.3 Effect of surface material | 37 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 4.1.2 | Fouling experiments..... | 39 |
| 4.1.2.1 | Effect of heat flux..... | 39 |
| 4.1.2.2 | Effect of CaSO ₄ concentration | 41 |
| 4.1.2.3 | Effect of tube material..... | 42 |
| 4.2 | Finned tubes | 44 |
| 4.2.1 | Clean heat transfer coefficient..... | 44 |
| 4.2.2 | Fouling experiments..... | 49 |
| 4.2.2.1 | Effect of heat flux..... | 49 |
| 4.2.2.2 | Effect of CaSO ₄ concentration | 53 |
| 4.2.2.3 | Effect of fin density..... | 55 |
| 4.2.2.4 | Effect of fin height | 61 |
| 4.2.2.5 | Effect of fin material | 64 |
| 4.2.2.5.1 | Effect of thermal conductivity of fin material..... | 68 |
| 4.2.2.5.2 | Effect of surface energy | 68 |
| 4.2.3 | Comparisons between plain and finned tubes | 69 |
| 4.2.4 | Reproducibility of fouling runs and cleanability of the finned tubes..... | 74 |
| 4.3 | Modified finned tubes (Turbo-B)..... | 76 |
| 4.3.1 | Turbo-B clean boiling performance | 76 |
| 4.3.2 | Fouling of Turbo-B tube | 78 |
| 4.3.3 | Reproducibility of experiments and cleanability of the Turbo-B tube..... | 81 |
| 4.3.4 | Comparison between Turbo-B and low finned tubes..... | 83 |
| 4.3.4.1 | Heat transfer to distilled water | 83 |
| 4.3.4.2 | Fouling from saturated CaSO ₄ solution..... | 86 |
| CHAPTER 5: THEORETICAL STUDY..... | | 89 |
| 5.1 | New correlation for boiling heat transfer coefficients on structured surfaces | 89 |
| 5.1.1 | Modified Gorenflo correlation for structured surfaces | 90 |
| 5.2 | Modelling of CaSO ₄ deposition on finned tubes during pool boiling | 93 |
| 5.2.1 | Kinetics of deposition process..... | 95 |
| 5.2.1.1 | Calculation of the concentration beneath bubbles “C _{bb} ” | 96 |
| 5.2.1.2 | Calculation of the deposit radius “r _{eff} ” | 99 |
| 5.2.2 | Prediction of fouling resistance..... | 101 |
| 5.2.2.1 | Case 1: no removal rate | 101 |
| 5.2.2.2 | Case 2: calculation of removal rate | 104 |

Table of Contents

| | |
|---|------------|
| 5.3 Mathematical modelling of the performance of structured tubes under clean and fouling conditions..... | 1 |
| 5.3.1 Mathematical development of the model..... | 1 |
| 5.3.1.1 Formulation of the model..... | 1 |
| 5.3.1.2 Solution procedures..... | 1 |
| 5.3.2 Fin efficiency calculation..... | 11 |
| 5.3.3 Results of the model..... | 11 |
| 5.3.3.1 Validation of the model..... | 11 |
| 5.3.3.2 Effect of fouling on the performance of fins during nucleate boiling..... | 11 |
| 5.3.3.2.1 Temperature distribution..... | 11 |
| 5.3.3.2.2 Fin efficiency..... | 11 |
| CHAPTER 6: CONCLUSIONS AND FUTURE WORK | 118 |
| 6.1 Conclusions..... | 118 |
| 6.2 Recommendations for future work..... | 120 |
| REFERENCES..... | 121 |
| APPENDIX A: Detailed Experimental Procedure..... | A-1 |
| APPENDIX B: Measurement of CaSO₄ Concentration | B-1 |
| APPENDIX C: Uncertainty Analysis | C-1 |
| APPENDIX D: Computer Program to Calculate the Thermal Performance of Finned Tubes under Clean and Fouling Conditions | D-1 |