

**UTILIZATION OF VARIOUS PROJECTILES TO MITIGATE FOULING
IN TUBULAR HEAT EXCHANGERS**

A dissertation accepted by the Faculty of
Energy-, Process- and Bio-Engineering of the
University of Stuttgart

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

by

Mohammad Reza Jalalirad, B.Sc., M.Sc.
born in Arak, Iran

*Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering
University of Stuttgart, Germany
Published 2016*

Supervisor: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen
Co-Examiners: Prof. Dr. –Ing. Günter Scheffknecht
and
Prof. Dr. –Ing. Stephan Scholl

Date of Oral Examination:

21st December, 2015

ABSTRACT

Heat exchangers are the workhorse of most chemical, petrochemical, food processing and power generating processes. Of the many types of heat exchangers, approximately 60% of the market is still dominated by shell and tube heat exchangers. One major problem of heat exchangers and particularly the shell and tube type is directly related to the deposition of unwanted materials on the heat transfer surfaces. Fouling may cause one or more of several major operating problems: i) reduction of heat transfer, ii) under-deposit corrosion, iii) increased pressure loss and iv) flow mal-distribution.

There are many different mitigation techniques available in the market to maintain the surface of heat exchangers clean to some extent. Among them are projectiles of various shapes, materials and hardnesses which circulate via a separate loop through the exchanger. The advantages of this method include effective fouling mitigation and stable operating conditions. Having said that, there are nevertheless numerous unanswered questions such as optimum injection interval, minimum required shear force to remove fouling layers, applicability of projectiles at elevated temperatures, minimum required velocity of projectile propulsion, and the criterion for the selection of projectiles for any specific fouling process. The present study, as part of a European Project entitled Clean-Ex, endeavors to address some of these questions.

A test rig was designed and constructed to simulate conditions under which fouling occurs in water service processes. The rig includes an online cleaning device which enables introduction of projectiles for various operating scenarios including i) continuous or ii) at different time intervals. A comprehensive set of experimental runs was carried out for crystallization fouling of CaSO_4 solutions with and without projectiles. Due to laboratory restrictions, fouling runs were performed at accelerated conditions to rigorously characterize the impact of projectile cleaning in terms of injection intervals and various types of projectiles.

The experimental results showed that the projectiles are capable of removing parts of the fouling layer at the early stage of the fouling process. The cleaning efficiency decreases as the fouling layer builds up such that the projectile is not effective when the asymptotic fouling is approached. In addition, shorter injection intervals of the projectiles decrease the asymptotic fouling resistance. Sintering of the fouling layer which hinders the cleaning action of projectiles should be accounted for this phenomenon. Furthermore, all projectiles decreased the induction time of the fouling process. The asymptotic fouling resistance was also approached much quicker compared to the case of no injection.

The performance of any projectile lies in a trade-off between its size, texture and stiffness. Stiffness produces a shear force required to dislodge the deposit and size is required to maintain the contact area between projectile and the surface. Accordingly, a criterion was developed to determine the optimum projectile size and stiffness for best

ABSTRACT

cleaning performance. The criterion shows that bigger and softer projectiles cannot last for a long time injection processes. Given the importance of size and stiffness, the projectiles were subsequently divided into two groups of hard and soft due to the required stiffness and velocity to move the projectile within the tube. To discriminate between these two groups, a new term called contact stability factor or Z factor is proposed which is a function of stiffness and size.

A mechanistic model has also been developed to predict the asymptotic fouling resistance when projectiles are in operation, based on injection rate, fouling rate and removal rates. The model predicts the asymptotic fouling resistance with an accuracy of 69% based on CaSO_4 concentration, saturation concentration, injection interval, shear force and contact stability of the tube with the projectile.

KURZFASSUNG

Wärmeübertrager sind das Arbeitspferd der meisten chemischen, petrochemischen, Lebensmittel- und Energieerzeugungsprozesse. Es gibt viele verschiedene Typen von Wärmeübertragern, allerdings werden etwa 60% des Marktes durch den Rohrbündelwärmeübertrager dominiert. Ein Hauptproblem von Wärmeübertragern und insbesondere dem Rohrbündeltyp wird direkt auf die Ablagerung von unerwünschten Materialien auf den Wärmeübertragungsflächen zurückgeführt. Fouling kann ein oder mehrere große Betriebsprobleme verursachen: i) Reduzierung der Wärmeübertragung, ii) Korrosion unter der Ablagerung, iii) erhöhter Druckverlust und iv) Strömungsfehlverteilung.

Es gibt viele verschiedene Minderungstechniken auf dem Markt, um die Oberfläche der Wärmeübertrager zu einem gewissen Grad sauber zu halten. Unter ihnen sind Projektile verschiedener Formen, Materialien und Härte, die seit Jahrzehnten verwendet werden, um Ablagerung im Rohrbündelwärmeübertrager zu reduzieren, indem sie in einem separaten Kreislauf zirkulieren und bei Gebrauch zugeschaltet werden. Die Vorteile dieser Methode sind die wirksame Minderung des Foulings und stabile Betriebsbedingungen. Es gibt jedoch zahlreiche unbeantwortete Fragen, wie optimale Injektionsintervalle, die mindestens erforderliche Scherkraft, um die Foulingschicht zu beseitigen, die Anwendbarkeit der Projektile bei erhöhten Temperaturen, die erforderliche Mindestgeschwindigkeit des Projektils, und das Kriterium für die Auswahl der Projektile für einen bestimmten Foulingprozess. Die vorliegende Studie ist bestrebt, einige dieser Fragen im Rahmen eines europäischen Projekts, das den Titel Clean-Ex trägt, zu beantworten.

Dazu wurde eine Versuchsanlage entwickelt und aufgebaut, um Bedingungen, unter denen Fouling in Brauchwasserprozessen auftritt, zu simulieren. Die Anlage umfasst eine Online-Reinigungsvorrichtung für die Einbringung von Projektilen für verschiedene Betriebszenarien, d.h. i) kontinuierlich oder ii) in unterschiedlichen Zeitintervallen. Eine umfassende Reihe von Versuchen wurde für das Kristallisationsfouling von CaSO_4 -Lösungen mit und ohne Projektile durchgeführt. Aufgrund der Beschränkungen auf Laborbedingungen wurde die Ablagerungsbildung bei beschleunigten Bedingungen durchgeführt, um die Wirkung der Reinigung durch Projektile hinsichtlich der Injektionsfrequenzen und der verschiedenen Arten von Projektilen deutlich zu charakterisieren.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Projektile Teile der Foulingschicht im frühen Stadium des Foulingprozesses entfernen können. Die Reinigungseffizienz nimmt ab, wenn sich die Foulingschicht aufbaut, so dass das Projektil wirkungslos ist, wenn sich das Fouling dem asymptotischen Endwert annähert. Außerdem verringert eine hohe Injektionsgeschwindigkeit der Projektile den asymptotischen Foulingwiderstand. Die

KURZFASSUNG

Sinterung der Foulingschicht, die die Reinigungswirkung von Projektilen behindert, ist für dieses Phänomen verantwortlich. Alle Projektile verringern die Induktionszeit; diejenigen, die ausreichend Kontakt haben, um eine größere Scherkraft auf die Oberfläche auszuüben, verringern den asymptotischen Foulingwiderstand. Das asymptotische Fouling wird dadurch viel schneller erreicht als ohne Injektion.

Die Leistung eines jeden Projektils liegt in einem Kompromiss zwischen Größe, Textur und Steifigkeit. Steifigkeit produziert die erforderliche Scherkraft, um die Ablagerungen zu entfernen, und die Größe bestimmt den Kontakt zwischen Projektil und der Oberfläche. Dementsprechend wurde ein Kriterium entwickelt, um die optimale Größe und Steifigkeit des Projektils für die beste Reinigungsleistung zu erhalten. Das Kriterium zeigt auch, dass größere und weichere Projektile längere Injektionszeiten nicht aushalten können. Angesichts der Wichtigkeit von Größe und Steifigkeit wurden die Projektile anschließend in zwei Gruppen von harten und weichen Projektilen eingeteilt. Dies geschah aufgrund der Steifigkeit und der erforderlichen Geschwindigkeit, um das Projektil im Rohr zu bewegen. Um zwischen diesen beiden Gruppen zu unterscheiden, wurde ein neuer Begriff, Kontaktstabilitätsfaktor oder Z-Faktor, vorgeschlagen, der eine Funktion der Steifigkeit und Größe ist.

Weiterhin wurde ein mechanistisches Modell entwickelt, um den asymptotischen Foulingwiderstand im Falle injizierter Projektile, basierend auf Injektions-, Fouling- und Minderungsdaten, vorherzusagen. Das Modell sagt den asymptotischen Foulingwiderstand mit einer Genauigkeit von 69% voraus, abhängig von der CaSO_4 Konzentration, der Sättigungskonzentration, dem Injektionsintervall und der Kontaktstabilität des Rohres mit Projektil.

Table of Contents

NOMENCLATURE	xiv
1 INTRODUCTION	1
1.1 Tubular Heat Exchangers in Industry	1
1.2 Fouling of Heat Exchangers.....	1
1.3 Challenges in Mitigating Deposit Formation in Tubular Heat Exchangers.....	2
1.4 Research Objectives	5
1.5 Scope of Present Study	5
2 LITERATURE REVIEW	7
2.1 Fouling Mitigation Techniques.....	7
2.2 Off-line Mitigation Techniques	7
2.3 On-line Mitigation Techniques.....	9
2.3.1 Cleaning projectiles.....	10
2.3.2 Technical limitations	14
3 EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE	15
3.1 Description of Test Facility.....	15
3.1.1 Process Flow Diagram (PFD)	15
3.1.2 Furnace design and specifications	19
3.1.3 Wall temperature of heated tube in the furnace	20
3.1.4 Projectile collector	22
3.1.5 Injection of projectiles	24
3.1.6 Flow control system.....	25
3.1.7 Filter	27
3.1.8 Visualization of projectile movement.....	27
3.1.9 Measurement of pressure drop.....	29
3.1.10 Data acquisition system	29
3.2 Experimental Procedure	29
3.2.1 Start-up at clean condition	29
3.2.2 Preparation of chemical solution.....	30
3.2.3 Preparation for fouling experiment	32

Table of Contents

3.3	Cleaning the Fouled Tube	32
3.4	Specification of Projectiles	32
3.5	Matrix of Operating Conditions	34
3.6	Data Reduction.....	37
3.7	Probing of the Heterogeneous Deposit Layer.....	39
3.8	Experimental Uncertainty and Error Analysis.....	40
4	EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION.....	42
4.1	Heat Transfer at Non-Fouling Condition.....	42
4.1.1	Effect of velocity on surface temperature	42
4.1.2	Effect of projectile movement on surface temperature and heat transfer rate	43
4.2	Fouling Runs without Projectiles	46
4.2.1	Fouling curves for different velocities	46
4.2.2	Fouling curve for different concentrations	47
4.3	Fouling Runs with Projectile Injection	48
4.3.1	Impact of projectile injection on cleaning	48
4.3.2	Compaction phenomenon	59
4.3.3	Cleaning action of projectiles in initiation, transition and asymptotic phases.....	60
4.3.4	Influence of sintering on the cleaning action of projectiles	63
4.4	Impact of Projectile Injection on the Induction Time	70
4.4.1	Injection after induction time	74
4.4.2	Influence of multiple injections on the induction time	75
4.4.3	Visualization of injected projectiles through the transparent glass tube.....	76
4.4.4	Influence of injected air on the induction time	79
4.5	Technical Problems in Using Projectile	82
4.5.1	Thermal shock due to cleaning by projectiles.....	82
4.5.2	Metal projectiles	82
4.6	Development of a Criterion to Compare Cleaning Performance of Various Projectiles under Fouling Conditions	85
4.7	Tribological Analysis of Various Projectiles.....	87
4.7.1	Dynamic shear force test	88
4.7.2	Hydrodynamic force test.....	89
4.7.3	Ideal projectiles and contact stability (Z factor)	92

Table of Contents

4.7.4	Effect of stiffness on contact stability.....	95
4.8	Criterion for the Selection of Efficient Projectiles	101
5	THEORETICAL STUDY	105
5.1	Kern and Seaton Model (1958).....	105
5.2	Model for Prediction of Fouling Resistance without Projectile Injection	107
5.3	Model for Prediction of Fouling Resistance with Projectile Injection	109
5.3.1	Representative saturation concentration	110
5.3.2	Asymptotic fouling resistance as a function of injection interval.....	114
5.3.3	Reaction constant of the Arrhenius equation.....	115
5.3.4	Constant value of developed model (k).....	116
6	CONCLUSIONS AND FUTURE WORK.....	119
6.1	Conclusions	119
6.2	Future Work.....	121
	References	123
	Appendix A – Weight Estimation of Heat Exchangers	I
	Appendix B – Measurement of CaSO_4 Concentration	IX
	Appendix C – Wilson Plot Method.....	X