

MESSUNG DER ABLAGERUNG KLEINER TEILCHEN AUS
STATIONAEREN UND OSZILLIERENDEN TURBULENTEN
ROHRSTROEMUNGEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften
der
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

JUERG WILDI
dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 25. 8. 1951
von Suhr (Aargau)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Thomann, Referent
Prof. Dr. M. Anliker, Korreferent

1982

MESSUNG DER ABLAGERUNG KLEINER TEILCHEN AUS STATIONÄREN UND OSZILLIERENDEN TURBULENTEN ROHRSTROMUNGEN

Kurzfassung

Die Ablagerung von festen Teilchen oder Tröpfchen aus turbulenten Strömungen an Kanalwände stellt ein in vielen technischen Anwendungen auftretendes Problem dar. Trotz der Vielzahl der in der Literatur erschienenen Beiträge zu diesem Thema besteht weder über die Grösse der Ablagerungsrate noch über den Mechanismus des Teilchentransportes in unmittelbarer Wandnähe eindeutige Klarheit.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Messeinrichtung zur direkten Erfassung der Wandablagerung von Wassertröpfchen im Grössenbereich 3 bis 25 μm aus turbulenter Rohrströmung. Als Trägerfluid dient gesättigte Luft, die Partikelkonzentration liegt in der Grössenordnung von 10^{10} Partikel/ m^3 und ist abhängig von den Strömungsbedingungen im Rohr. Versuche mit stationären Rohrströmungen werden für Rohrreynoldszahlen zwischen 10^4 und $2 \cdot 10^4$ durchgeführt, wobei sich mit den vorhandenen Partikeln ein Teilchenrelaxationsbereich $0,2 < \tau_+ < 20$ mit $\tau_+ = \frac{1}{18} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right) \cdot d_+^2$ abdecken lässt. Für genügend grosse Partikel mit genügend hohen Relaxationszeiten wächst die Teilchenablagerungsrate proportional mit dem Quadrat der Relaxationszeit in Uebereinstimmung zu einer in der Literatur mehrfach gefundenen Abhängigkeit. Kleinere Tropfen zeigen eine von ihrer Relaxationszeit resp. bei festgehaltener Rohrreynoldszahl ihrem Durchmesser nicht mehr stark abhängige Ablagerungsgeschwindigkeit. Der Uebergang zur Proportionalität mit τ_+^2 verschiebt sich mit zunehmender Rohrreynoldszahl zu grösseren Partikeln resp. höheren Relaxationszeiten.

Mittels eines am Rohrende angebrachten Kolbens mit Antriebseinheit werden an der Messstelle Schwingungen erzeugt, deren Amplitude und Frequenz so gewählt sind, dass Versuche

im Uebergangsgebiet von laminarer zu turbulenter Strömung durchgeführt werden können. Das Ablagerungsverhalten der Teilchen hängt wesentlich von der Turbulenzintensität ab, wobei wiederum die Ablagerung kleiner Partikel kaum von ihrem Durchmesser abhängt. Die Turbulenzkennzahl für Schwingungen, $A = \frac{2 \cdot \hat{u}}{\sqrt{\nu \omega}}$, ist nicht die allein massgebende Grösse für die Ablagerungsintensität, wächst doch die Anzahl an die Wand abgesetzter Teilchen mit zunehmender Schwingungsfrequenz bei festgehaltenem A-Wert.

Kontrollversuche bestätigen, dass die mit der aufgebauten Versuchsanlage ermittelten Ablagerungswerte aus turbulenter Strömung weder von Kräften elektrischer Effekte verfälscht noch durch Verdunstungsvorgänge wesentlich beeinflusst werden.

Zur Beschreibung des Ablagerungsverhaltens der kleinen Partikel steht mit der derzeitigen Kenntnis der extrem wandnahen Turbulenzvorgänge kein allgemein gültiges Modell zur Verfügung, das exakte numerische Resultate liefern könnte. Am Beispiel des Verhaltens von in eine laminare Scherströmung eindringenden Teilchen wird eine Grenze der konventionellen Ablagerungsmodelle aufgezeigt, ohne dass damit jedoch eine numerische Uebereinstimmung mit den unerwartet hohen gemessenen Ablagerungswerten der kleinen Partikel erzielt werden kann.

Die experimentellen Resultate können zur Abschätzung der Ablagerung von Partikeln in den oberen Partien der menschlichen Atemwege herangezogen werden. Unbeabsichtigt aus der Umgebungsluft eingeatmete Fremdpartikel (Staub, Rauchteilchen usw.) werden mit der laminaren Strömung, wie sie bei Ruheleistung in der Trachea und den Hauptbronchien vorhanden ist, grösstenteils wieder ausgeatmet, während sich in turbulenter Strömung Partikel in beträchtlicher Anzahl an die Rohrwände absetzen. Anstrengende körperliche Tätigkeiten in mit schädlichen Partikeln beladenen Umgebungsluft bergen die Gefahr der Ablagerung dieser Teilchen an den Luftröhrenwänden, ohne dass diese mit der ausgeatmeten Luft aus den Atemwegen heraustransportiert werden können.

MEASUREMENT OF THE DEPOSITION OF SMALL PARTICLES IN
STATIONARY AND OSCILLATING TURBULENT PIPE FLOW

Abstract

The deposition of solid particles or droplets from turbulent streams to channel walls is an important problem in a variety of technical applications. In spite of the numerous publications on this subject, there is not a clear understanding neither of the deposition rate nor of the transportation mechanism in the flow very close to the wall.

This paper describes an experimental set up to measure the deposition rate of water droplets in a turbulent stream of saturated air. The particle diameters range from 3 to 25 micron and the particle concentration is of the order of 10^{10} particles/m³, depending on the flow conditions in the pipe. The experiments are conducted in stationary flow for pipe Reynolds numbers between 10000 and 20000. A τ_+ -range from 0.2 to 20 is covered, where $\tau_+ = \frac{1}{18} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right) \cdot d_+^2$ is the dimensionless particle relaxation time. For sufficient large particles the deposition rate increases proportional to the square of the relaxation time in accordance with various existing experimental results. The deposition of the very small particles changes only slightly with the relaxation time or the particle diameter if the pipe Reynolds number is kept constant. The threshold for quadratic dependence of the deposition rate from relaxation time moves to larger particles (or higher relaxation times) with increasing pipe Reynolds numbers.

A piston mechanism at one end of the test channel enables deposition measurements also in oscillating flow. The amplitudes and frequencies of the oscillation are chosen to generate conditions in the transition region between laminar and turbulent flow. The deposition behaviour strongly depends on the turbulence intensity. The deposition rate of the very small particles hardly changes with particle diameter as in

the stationary case. The number $A = \frac{2 \cdot \hat{u}}{\sqrt{\nu \omega}}$, characteristic for the appearance of turbulence in oscillations, is not the only determining factor for the deposition rate, which increases with the oscillation frequency even if A is kept constant.

Some additional experiments confirm that the deposition rate is not influenced by forces on the particles by electrical field and that the particle evaporation only becomes important for the smallest particles used in this investigation.

With the present knowledge of turbulent flow extremely close to the wall, there is no generally valid model to numerically describe the deposition mechanism. The motion of a single particle entering a laminar shear layer cannot be treated by the classical free-flight model. A calculation of the particle motion shows the limitations of the existing conventional deposition theories. The measured unexpectedly high deposition rates for small particles disagree with conventional theoretical predictions.

The experimental results may be used to evaluate the deposition rate of inhaled particles to the walls of the human respiratory system. In laminar flow, which is typical in the upper part of the human airways for breathing at rest, the great part of inhaled particles is transported out again during exhaling. With increasing physical body activity the breathing volume and the frequency increase. The flow becomes more and more turbulent. In this case, a heavy deposition of particles has to be expected during in- and exhaling. Hard bodily work in an environment of harmful particles (dust, smoke, etc.) incur the risk of deposition of these particles.