

Bagrjancev, V. I., Kislych, V. I.

STÖRUNG DER VERTEILUNG VON KLEINPARTIKELN IN DER WIRBELKAMMER

Deutsche Vollübersetzung aus:

Izvestija. Sibirskoe otdelenie Akademii nauk SSSR. Serija tehničeskich nauk. Novosibirsk, 1 (1980), Nr 3, S. 23 - 29.

Russ.: НАРУШЕНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ  
В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Narušenie razdelenija melkich častic v vichrevoj kamere

Die Arbeit enthält die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung der Fliehkraftverteilung von Partikeln aus einem Gasstrom in der Wirbelkammer. Diskutiert wird die Bildung der versuchsmäßig gewonnenen zylindrischen Oberflächen mit hoher Konzentration der festen Phase in der Axialzone der Wirbelkammer.

Unter bestimmten Bedingungen werden die in der Wirbelkammer befindlichen Kleinpartikel nicht an die Wand geschleudert, obwohl sie großen Fliehkraftbeschleunigungen unterliegen, sondern sammeln sich im Behälter und bilden eine stabile Form. Wenn man die Zugabe von Dispersionsstoffen unterbricht, können die restlichen Partikel der kondensierten Phase dort lange Zeit verweilen.

Bekannt sind die Fälle /1/, wo experimentell festgestellt wurde, daß sich die Separierung der Partikel verschlechtert oder gestört wird. Die vermuteten Erklärung hierfür beziehen sich hauptsächlich auf Kennwerte, die entweder mit der unrunder Form der Partikel zusammenhängen oder mit besonderen Bedingungen ihres Verhaltens (Rotation, wiederholtes Eingefangenwerden durch Turbulenzpulsationen, Abweichung vom Stokeschen Gesetz in

rotierenden Strömungen und dgl.). Eine einheitliche Auffassung für diese Erscheinung gibt es nicht, weil Versuchsangaben fehlen, und die man durch Untersuchungen der Wirbelströmung mit Sonderverfahren nur schwer ermitteln kann.

Versuchsanlage und -verfahren. Die Versuche wurden an einer wie in Abb. 1 schematisch dargestellten Anlage durchgeführt. Die Wirbelkammer war ein zylindrisches Glasrohr 1 mit 160 mm Durchmesser und mit bis zu 5 Kaliber Länge, stirnseitig mit flachen Deckeln 2 abgeschlossen. Um den oberen Deckelrand befand sich der Luftwirbler 3, in der Deckelmitte war eine Auslaßöffnung. Die Anlage enthielt auch den Rauchgenerator 4, das Beleuchtungsgerät 5, den Fotoapparat 6, den Spannungs-Frequenzumwandler 7, den Frequenzmesser 8, die numerische Druckmaschine 9 und ein Batteriemanager 10.

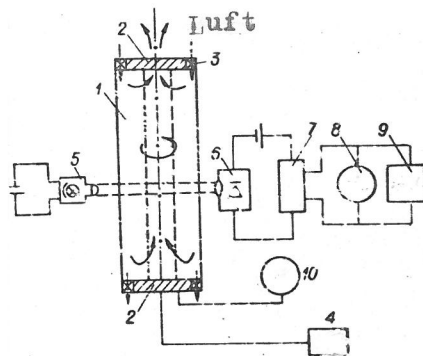


Abb. 1. Schematische Darstellung der Versuchsanlage

Die Versuche wurden folgendermaßen durchgeführt: Durch den Wirbler 2 wurde Luft in die Wirbelkammer geblasen und durch die Spalte am unteren Stirndeckel und die Auslaßöffnung im oberen Stirndeckel herausgelassen. Der aus dem Generator 4 kommende Rauch wurde durch das Loch im oberen Stirndeckel periodisch im Axialbereich der Wirbelströmung eingeblasen. Die Wirbelkammer wurde in der Mitte mit gebündeltem Licht aus dem Beleuchtungsgerät 5 angestrahlt.

Nach Zufuhr von Rauch aus dem Generator 4 stellte man in der Wirbelkammer eine stationäre Bewegung der Wirbelströmung fest. Zu dieser Zeit wurde auch gemessen, nämlich: Luftdurchsatz durch den Wirbler, Luftdurchsatz durch die Auslaßöffnung, Druckverteilung auf den Kammerradius am unteren Stirndeckel, zeitliche Veränderung der durchschnittlichen Konzentration des Gemisches, das im Axialbereich der Wirbelkammer verblieben war.

Hauptsächlich wurde die Strömung mit Partikeln aus Zigarettenrauch mit bis zu  $3\ \mu\text{m}$  Durchmesser getrübt. Teilweise wurde auch Rauch aus annähernd gleich großen Ammoniumchloridteilchen eingeblasen, die jedoch rechteckig waren. Es wurden auch polydisperse Gemische von Teilchen aus Quarzsand, Ruß und Aluminium verwendet. Die Partikel wurden sowohl in den Axialbereich der Strömung durch das Loch im Einlaß als auch in die Gesamtströmung über die Einstrahlanlage eingemischt. Die Struktur der aus den Rauchpartikeln entstehenden Gebilde wurde makrophotographisch und mit Zeitrafferfilm (600 Bilder/sec) untersucht. Abmessungen und Form der Partikel wurden mikroskopisch untersucht. Im Auslaßquerschnitt des Axialbereichs wurden die Partikel mit einer Glasplatte aufgefangen. Diese Platte war mit einer viskosen Substanz eingeschmiert (zur mikroskopischen Analyse). Während des Versuchs wurde die Veränderung der Konzentration der Suspension in der Kammer nach der Rauchzufuhr festgestellt. Nach der abnehmenden Lichtstärke wurde die relative Konzentration der Suspension bestimmt (Lambertsches Absorptionsgesetz). Die Signale der Kamera wurden kodiert und eingelesen. Da die Rauchkonzentration bei Versuchsbeginn  $c_*$  maximal war und konstant abnahm, diente zur Bestimmung der Verweildauer der Rauchpartikel in der Kammer die Relation  $c(\tau)/c_*$ , d.h.

$$\tau = \int_0^{\infty} c(\tau)/c_* d\tau. \quad (1)$$

Über die Druckmessungen an den Stirnseiten der Kammer konnte ohne Störung des Strömungsbildes das Umfangsgeschwindigkeitsfeld ermittelt werden, ausgehend von der Gleichgewichtsbedingung bei einer Wirbelströmung,

$$1/\rho \frac{\partial p}{\partial r} = v_\phi^2/r. \quad (2)$$

Wichtigste Ergebnisse. Eine Störung der zentrifugalen Verteilung des Luftkolloids ist bezeichnend für koaxiale Rauchzylinder, achsenparallele

Strömungen, deren Durchmesser größer als der Auslaßdurchmesser und deren Höhe annähernd gleich der Kammerlänge ist. Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt des Rauchbildes. Die Aufnahme ergab, daß die Axialgeschwindigkeit der Partikel zu beiden Seiten des äußeren Rauchzylinders entgegengesetzt gerichtet ist, d.h. daß eine Schubströmung auftritt, wobei die Partikel radial nicht transportiert werden. Auf dem äußeren Rauchzylinder bilden sich bisweilen sekundäre Strömungen, die an Wirbelringe erinnern. Diese Wirbelbildungen in Form von Wirbelringen sind nicht immer an der Oberfläche der Rauchsäule vorhanden. Die Wirbelringe können sich beruhigen (dieser Zustand ist instabil) oder sich nach oben bzw. unten längs des Zylinders der Rauchsäule bewegen.

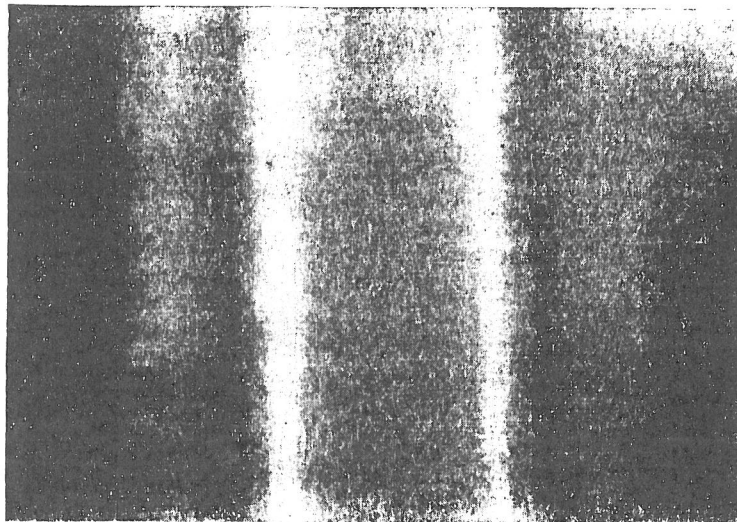


Abb. 2. Rauchzylinder im Wirbel

Die Art der Rauchbilder hing nicht von der Sorte der in den Versuchen verwendeten Partikel ab. Stark wirkte sich jedoch der Einfluß des Partikeldurchmessers aus. Partikel mit über  $20\ \mu\text{m}$  bildeten keine Anhäufungen in der Kammer, sondern wurden an die Zylinderwände gedrückt. Die Fraktionszusammensetzung der Rauchsäule wurde anhand des Auswurfes aus dem zentralen Auslaß analysiert. Bei der Untersuchung der Zusammensetzung der Partikel in der Kammer wurde eine Einwaage aus Quarzsand mit einem Partikeldurchmesser von  $0 - 60\ \mu\text{m}$  zugegeben. Nachdem sich die groben Partikel aus der Rauchsäule abgesondert hatten, wurden Proben entnommen, wobei die feinen

Partikel im Axialbereich einen stationär rotierenden Rauchzylinder bildeten. Die Meßergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Daraus geht hervor, daß die disperse Zusammensetzung der Fraktion in der Rauchsäule nicht zeitabhängig ist. Da nur solche Partikel in der Kammer vorhanden sind, die Rauchansammlungen bilden, werden diejenigen Partikel durch die zentrale Auslaßöffnung transportiert, die zur Rauchsäule gehören, d.h. im Axialbereich des Wirbels befinden sich Partikel mit Abmessungen bis zu  $5\mu\text{m}$ .

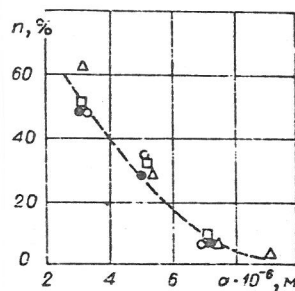


Abb. 3. Partikel aus der zentralen Auslaßöffnung  
Probenentnahme nach 10 (o), 20 ( $\Delta$ ), 30 ( $\square$ ) und 35 ( $\bullet$ ) s.

Wesentlichen Einfluß auf die Bildung der Rauchzylinder besitzen folgende Werte:  $q = Q_*/Q$  für die Relation Luftdurchsatz durch die zentrale Auslaßöffnung zum Gesamtdurchsatz durch die Kammer, sowie die Höhe des Gesamtdurchsatzes durch die Anlage. Abb. 4 zeigt den Bereich für die entstandenen Rauchformationen. An der Abszisse ist die Re-Zahl aufgetragen, die nach dem Luftdurchsatz durch die Kammer und nach deren Durchmesser konstruiert wurde. Aus Abb. 4 geht hervor, daß bei  $q \sim 0$  keine Rauchformationen vorkommen. In diesem Fall verläuft die Strömung ohne Luftabfluß in den Axialbereich.

Aufgrund der starken Streuung gelang es nicht, die Grenze der Rauchzylinderbildung nach dem Wert  $q$  genau zu bestimmen. Nach  $Re$  ist der Bereich der entstandenen Rauchsäulen nicht groß. Wahrscheinlich hängt dies damit zusammen, daß sich die Fliehkraftbeschleunigung mit dem Durchsatzquadrat ändert, wohingegen sich die Kraft, von der die Bildung der Rauchsäule abhängt, sich mit dem sich verändernden Durchsatz schwächer ändert.

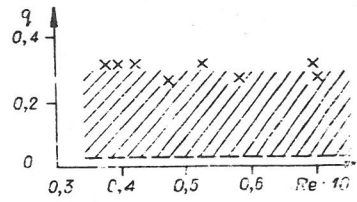


Abb. 4. Bereich der entstandenen Rauchzylinder in der Wirbelkammer

Der Wert  $q$  beeinflusst ganz stark die Verweildauer der Partikel in der Kammer (Abb. 5). Auf der Ordinate ist in Abb. 5 die charakteristische Verweildauer der Partikel in der Rauchsäule aufgetragen. Sie wurde nach Formel (1) berechnet. Diese Größe ist bezogen auf den Zeitraum, in dessen Verlauf sich die Partikel in einem Rohr mit entsprechendem Durchmesser bei gleichem Durchsatz befinden. Bei  $q = 0,3$  wurde die maximale Verweildauer der Partikel in der Kammer erreicht. In einzelnen Versuchen hielt sich der Rauch in der Kammer bis zu einer halben Stunde, d.h. der Zustand der Strömung mit der Rauchsäule im Axialbereich ist konstant.

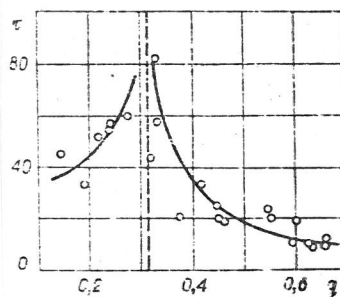


Abb. 5. Abhängigkeit der dimensionslosen Verweildauer  $\tau$  der Partikel in der Rauchsäule von der Durchsatzrelation  $q$

Durch Variieren des Durchsatzes  $q$  durch die Zentralauslaßöffnung kann man die Richtigkeit der Behauptung bestätigen, daß infolge Gleichheit der Radialkomponenten der Stokeschen Kraft und der Fliehkraft, die auf die Partikel wirken, Oberflächengleichgewicht herrscht. Mit veränderlichem  $q$  verändert sich die Gasgeschwindigkeit durch die Rauchfläche proportional zu  $q$ , während die Fliehkraftbeschleunigung sich wie  $q^2$  verändert. Deshalb müßte bei Partikeln mit Feinfraktionierung die Veränderung des Durchsatzes durch das Zentrum zu einer Verschiebung der Gleichgewichtsflächen führen. Aus den Versuchen geht hervor, daß bei der festgelegten Kammergeometrie die Gleichgewichtsflächen immer in streng festgelegter Lage bleiben und nicht von  $q$  abhängen. Deshalb kann man die Hypothese anzweifeln, Grund für die Bildung der Rauchsäulen sei die Gleichheit der (entgegengesetzt gerichteten) Kräfte zur Fliehkraft und zur Radialkomponente der Stokeschen Kraft.

Diese Hypothese ist jedoch aus folgendem Grunde hilfreich: bei gleichem Luftdurchsatz bleibt die Größe der Beschleunigung bei Kammern unterschiedlicher Höhe genau gleich bis auf die Reibungsverluste an den Wänden, wohingegen sich die Geschwindigkeit der Radialströmung ins Zentrum mit Veränderung der Kammerhöhe ändern muß. Da Zigarettenrauch beinahe monodispers ist, würde eine Verletzung der Gleichheit von Fliehkraften und aerodynamischen Kräften zu einer Störung des Rauchbildes führen, während die Art der Rauchansammlungen bei gleichem Durchsatz und verschiedenen Kammerhöhen unverändert blieb. Die Längsmaße der Kammer wurden im Versuch zwischen 0,05 und 0,5 m variiert.

Bekanntlich besitzt die dreidimensionale Strömung in der Wirbelkammer Bereiche mit hohen Geschwindigkeitsgradienten: dies sind die Strömungsschichten, die an die Wände angrenzen, und das Wirbelzentrum. Besonders anschaulich läßt sich dies anhand der Versuchsangaben in /2/ illustrieren. In Abb. 6 ist das Bild der Strömungslinien aus der genannten Arbeit dargestellt. An der Ordinate ist der dimensionslose Abstand von der Stirnfläche aufgetragen, an der Abszisse der laufende dimensionslose Radius. Im Axialbereich liegt ein ringförmiger Wirbel, der sich über die Symmetrieachse zieht. Im Stirnbereich grenzt der Ringwirbel an die Stirnfläche an und erstreckt sich in Radialrichtung. Aufgrund des geringen Wirbelquerschnitts erreichen die Geschwindigkeitsgradienten quer zum Wirbel große Werte.

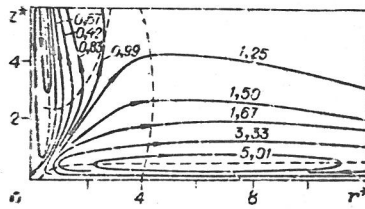


Abb. 6. Bild der Strömungslinien in der Wirbelkammer /2/

In der Nähe der Grenze des Wirbelzentrums liegen die Maxima der Gradienten der axialen, radialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten. Deshalb kann man annehmen, daß die Kraft, deren Auftreten durch den Geschwindigkeitsgradienten bedingt ist, wesentlichen Einfluß hat auf die Bewegung der feinen Partikel in den Wirbelbereichen mit hohen Geschwindigkeitsgradienten und folglich auch auf die Entstehung der Rauchsäulen im Axialbereich. Die auf die Partikel wirkende Kraft, die den Geschwindigkeitsgradienten hervorruft, hat in der Literatur die Bezeichnung seitliche oder Hubkraft erhalten.

Die Hubkraft. Zur Verifikation der hergeleiteten Annahme über den Einfluß der Hubkraft auf die Bildung der Rauchzylinder im Wirbel sind Angaben über die Größe der Hubkraft erforderlich. Bei der Auswertung der Arbeiten /3, 4/ zeigte sich, daß die ermittelten theoretischen Relationen auch qualitativ stark voneinander abweichen. In der Safeman-Gleichung /3/

$$F = k\mu V (dv_z/dy)^{1/2} a^2 / \nu^{1/2} \quad (3)$$

ist die Größe der Hubkraft proportional zum Radiusquadrat der Partikel und hängt von der Viskosität ab, während in Slezkins und Šustovs Gleichung /4/

$$\vec{F} = ka^3 [\vec{V} \text{ rot } \vec{v}] \quad (4)$$

der Partikelradius kubisch ist und die Hubkraft nicht von der Viskosität abhängt. Die veröffentlichten Literaturangaben sind auch nicht geeignet, da die Ergebnisse für Partikel mit einem Durchmesser in der Größenordnung



von 1 mm ermittelt wurden und von vielen Funktionskennwerten abhängen. Deshalb kann man die Angaben aus /5/ keinesfalls auf ganz feine Partikel übertragen. Zur Bestimmung der Hubkraftgröße bei Rauchpartikeln wurde eine experimentelle Untersuchung durchgeführt. Die Meßstrecke der Anlage bestand aus organischem Glas in Form eines flachen Kanals mit den Abmessungen 6 x 40 x 1000 mm. In den Versuchen wurden Partikel aus festem Ammoniumchlorid mit bis zu 3 mm Durchmesser verwendet. Der Luftdurchsatz wurde so gewählt, daß die Strömung im Kanal laminar war, d.h. die Durchschnittsgeschwindigkeit lag nicht über 0,7 m/s. Sie wurde bei den Versuchen zwischen 0,05 und 0,5 m/s gemessen. Die Versuche wurden bei zwei Kanalstellungen durchgeführt: a) Strömungsrichtung entgegen zur Richtung des Schwerkraftvektors; b) übereinstimmende Richtungen.

Die Experimente wurden nach folgendem Verfahren durchgeführt. Bei Vorgabe von Luftdurchsatz und Kanalstellung wurde an den Kanaleinlaß ein Gemisch aus Luft und Ammoniumchlorid gegeben. Die Meßstrecke des Kanals mit den Partikeln wurde fotografiert. Das Negativ wurde im Mikrofotometer MF-4 fotometrisch bestimmt. Nach den Durchlasskoeffizienten wurde die Partikelkonzentration bestimmt (auf diese Weise wurde nur die relative Einstäubung der Strömung gemessen).

Die experimentell ermittelten Ergebnisse der dimensionslosen Konzentration sind in Abb. 7 dargestellt. Darin ist an der Ordinate der Konzentrationswert aufgetragen, der sich auf ihre Konzentration in der Kanalmitte bezieht. An der Abszisse ist der Abstand von der Kanalmitte, bezogen auf seine Halbbreite, angegeben. Aus Abb. 7 geht hervor: ist die Bewegungsrichtung des Aerosols entgegengesetzt zur Richtung des Schwerkraftvektors, d.h. unter Einwirkung der Schwerkraft fallen die Partikel von der Strömung ab, so ist ihre Konzentration in der Kanalmitte maximal (Punkte 2 in Abb. 7).

Im entgegengesetzten Fall, d.h. wenn die Bewegungsrichtung des Aerosols mit der Richtung der Schwerkraft übereinstimmt und folglich die Partikel die Gasströmung überholen, ist die Partikelkonzentration an den Kanalwänden maximal (Punkte 1 in Abb. 7).

Die Experimente zeigten, daß die Migration der Partikel mit der Richtung der Vektorableitung übereinstimmt:

$$w_y \sim [\vec{V} \text{rot } \vec{v}].$$

Eine Migration der Partikel in einer zur Kanalachse senkrechten Richtung wurde im gesamten untersuchten Strömungsgeschwindigkeitsbereich (0,05 bis 0,5 m/s) festgestellt. Dabei hing die Migrationsgeschwindigkeit der Partikel stark von der Rauchkonzentration am Kanaleintritt ab. Mit zunehmender Partikelkonzentration am Kanaleintritt verschlechtert sich die Trennung des Aerosols und wird bei  $c > c_*$  völlig gestört. Wahrscheinlich hängt dies mit dem Kollektivverhalten der Partikel zusammen.

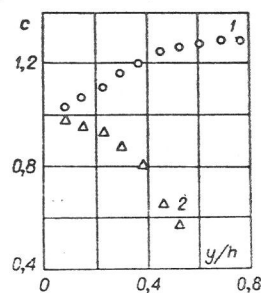


Abb. 7. Verteilung der Partikelkonzentration über die Kanalhalbbreite

- 1) die Partikel sind schneller als die Strömung;
- 2) die Partikel fallen von der Strömung ab.

Die Migrationsgeschwindigkeit der Partikel anhand der Versuchsergebnisse wurde aufgrund folgender Überlegungen geschätzt. Der Abstand vom Trennungsbereich (der Abstand wurde vom Kanaleintritt aus gerechnet) bis zum Bildungsbereich einer hohen Partikelkonzentration sei gleich  $l$ , dann durchläuft ein Partikel diese Strecke in der Zeit  $\tau = l/v_x$ . Ihre Geschwindigkeit in Querrichtung wird durch die Relation  $w_y = (h - b)/\tau = [(h - b)/l]v_x$  ausgedrückt, wobei  $h$  die Halbbreite des Kanals bezeichnet,  $b$  die Halbbreite des Bereichs mit der hohen Partikelkonzentration. Zur Einschätzung der Migrationsgeschwin-

digkeit nach den bekannten Gleichungen schreiben wir das Kräftegleichgewicht quer zu den Strömungslinien so:

$$\left. \begin{array}{l} k\mu V (dv_x/dy)^{1/2} a^2/v^{1/2} \\ ka^3 [\vec{V} \text{ rot } \vec{v}] \end{array} \right\} F = 6\pi\mu a w_y \quad (6)$$

(bei feinen Partikeln kann man die Beschleunigung vernachlässigen). Die Migrationsgeschwindigkeit der Partikel ist nach den Angaben unserer Versuche  $w_y = 10^{-3}$  m/s, was größenmäßig einer Kraft von der zehnfachen Beschleunigung der Schwerkraft entspricht. Nach den Gleichungen (3) und (6) ist der Wert  $w_y = 10^{-5}$  m/s, nach den Gleichungen (4) und (6)  $w_y = 10^{-6}$  m/s, d.h. die experimentell gemessene Migrationsgeschwindigkeit der Partikel ist um 2 - 3 Größenordnungen größer als nach den theoretischen Gleichungen vorhergesagt.

Die experimentell ermittelten Ergebnisse und die durchgeführten Bewertungen der Hubkraftgröße lassen die Annahme zu, die Hubkraft habe einen wesentlichen Einfluß auf das Verhalten der feinen Partikel im Axialbereich.

Folgende Bezeichnungen wurden in dieser Arbeit benutzt:  $\vec{V}$  Strömungsgeschwindigkeit des Gases;  $r, \psi, z$  Zylinderkoordinaten;  $x, y, z$  Kartesische Koordinaten;  $q$  Relation des Gasdurchsatzes durch die zentrale Auslaßöffnung zum Gesamtdurchsatz;  $\vec{V}$  relative Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel und des Gases;  $\mu, \nu$  dynamische und kinematische Viskosität der Strömung;  $a$  Partikeldurchmesser;  $\vec{F}$  Hubkraft;  $\vec{w}$  Partikelgeschwindigkeit;  $\tau$  laufende Zeit; Stokesche Zahl;  $g$  Schwerkraftbeschleunigung;  $k$  Proportionalitätsfaktor im Ausdruck für die Hubkraft.

Die Autoren danken S.S. Kutateladze für seine wertvollen Ratschläge bei der Durchführung der Arbeit und der Diskussion der Ergebnisse.

Institut für Wärmephysik  
der Sibirischen Abteilung  
der Akad.d.Wiss.d. UdSSR,  
Novosibirsk

Redaktionseingang  
18.12.1978

1. Хазингер С. Предел центробежного разделения частиц в свободном вихре.— РТК, 1971, 9, 4.

Chasinger, S.: Predel centrobežnogo razdelenija častic v svobodnom vichre.

In: RTK. 9 (1971), Nr 4.

<Grenze der Fliehkraftverteilung von partikeln in einem freien Wirbel; russ. - Quelle nicht zu ermitteln>

2. Wan, C.A., Chang, C.C.: Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe.

In: Journal of atmospheric sciences. Lancaster, Pa., 29 (1972), Nr 1, S. 116 - 127.

3. Сафмен П. Г. Подъемная сила малой сферы при медленном течении сдвига.— Механика, 1966, 1.

Sáfmen, P.G.: pod"emnaja sila maloj sfery pri medlennom tečenii sdviga.

In: Mechanika. 1 (1966).

<Die Hubkraft eines Kleinkörpers bei langsamer Schubströmung; russ. - Quelle nicht zu ermitteln>

4. Слезкин Н. А., Шустов С. Н. Об устойчивости движения взвешенной частицы в ламинарном потоке.— ДАН СССР, 1954, 96, 5.

Slezkin, N.A., Šustov, S.N.: Ob ustojčivosti dviženija vzvešennoj časticy v laminarnom potoke.

In: Doklady. Akademija nauk SSSR. Gidromechanika. Moskva, 96 (1954), Nr 5, S. 933 - 936.

<Über die stabile Strömung einer suspendierten partikel in einem laminaren Strom; russ.>

5. Джеффри Р., Пирсон Дж. Движение частиц в ламинарном потоке в вертикальной трубе.— Механика, 1966, 1.

Džeffrej, R., Pirson, Dž.: Dviženie častic v laminarnom potoke v vertikal'noj trube.

In: Mechanika. 1 (1966).

<Bewegung von Partikeln in einer laminaren Strömung in einem senkrechten Rohr; russ. - Quelle nicht zu ermitteln>

Stuttgart, den 25. Februar 1986

übersetzt von:

*Ottmar Pertschi*  
(Ottmar Pertschi)  
Dipl.-Übersetzer