

Turbulenter Wärme- und Stoffaustausch in stark turbulent gemachten Strömungen

B. P. Mironov, V. N. Vasečkin, V. N. Mamonov, N. I. Jarygina

Eine Reihe von Aufgaben der Praxis, die mit der Schaffung von energetischen Hochleistungsanlagen, mit der Erhöhung der Prozessintensität in der chemischen Technologie usw. verbunden sind, erfordern systematische Untersuchungen des komplexen Einflusses verschiedener Faktoren auf turbulente Austauschprozesse, z. B. Kompressibilität, nichtisothermes Verhalten, Stoffquerströmung, Längsdruckgradient und andere. Eine weitverbreitete Bedingung, die sich auf turbulente Austauschprozesse in fast allen realen Konstruktionen auswirkt, ist der erhöhte Turbulenzgrad der Anströmung. Eine verhältnismäßig geringe Erhöhung der Wandreibung, des Wärme- und Stoffaustauschs bei einer Intensität der äußeren Turbulenz in der Größenordnung von einigen Prozenten führte dazu, daß systematische Untersuchungen auf diesem Gebiet früher nur dem Einfluß der äußeren Turbulenz auf den laminar-turbulenten Umschlag gewidmet waren, da hier der Einfluß stärker spürbar war.

Im Falle des gemeinsamen Einflusses verschiedener Störfaktoren können jedoch in Abhängigkeit vom Änderungsbereich der Störfaktoren solche Situationen auftreten, bei denen die Intensität der Austauschprozesse unter Einwirkung eines der Faktoren sich um eine Größenordnung und mehr ändert. Dies wird im weiteren am Beispiel des Wärme- und Stoffaustauschs an einer durchlässigen Fläche in einer stark turbulent gemachten Strömung gezeigt.

Die Messungen verschiedener Autoren an undurchlässigen Flächen, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden, zeigten, daß bei der Verwirbelung der Strömung an Gittern sich die Wärmeabgabe merklich erhöht, die Wandreibung in der turbulenten Grenzschicht zunimmt und die Mikrostruktur der Grenzschicht sich ändert. Dabei sind Maßstab und Intensität der Turbulenz der Hauptströmung die den Einfluß der äußeren Turbulenz auf die Austauschprozesse kennzeichnenden Größen. Verschiedene zusätzliche Bedingungen für die äußere Umströmung des Körpers, wie beispielsweise die physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit, spielen ebenfalls keine geringe Rolle.

Die von den Autoren in stark turbulent gemachten Strömungen an Doppelgittern mit Gummifähnchen bei vorhandener Stoffquerströmung an der Wand durchgeführten Experimente, die ausführlich in [1] bis [3] beschrieben sind, zeigten folgendes. Die äußere Turbulenz ruft eine Deformation des Profils der mittleren Geschwindigkeit und der Intensität der turbulenten Geschwindigkeitspulsationen hervor; die Geschwindigkeitsprofile werden voller, die Turbulenzintensität nimmt über die gesamte Schichtdicke zu, das Maximum in der Verteilung der Intensität verschiebt sich näher an die durchlässige

Fläche. Bei intensivem Einblasen, wenn an der porösen Wand eine Verdrängungsschicht entsteht, deren Grenze man sicher aufgrund der Änderung des Charakters und der Intensität der turbulenten Geschwindigkeitspulsationen registrieren kann, führt die äußere Turbulenz zum verzögerten Herausbilden einer dynamischen Verdrängungsschicht, d. h. es wird der dynamische kritische Parameter des Einblasens erhöht. Dies ist auf Bild 1

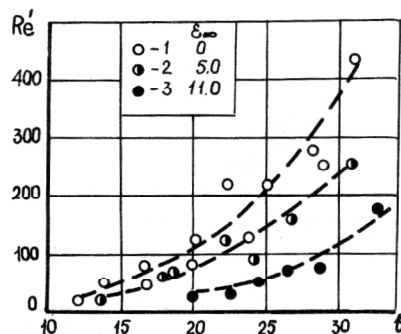


Bild 1
Abhängigkeit der Verdrängungsschichtdicke vom Parameter des Einblasens bei verschiedenen Turbulenzgraden der äußeren Strömungen

dargestellt. Die Ergebnisse sind als Abhängigkeit der Reynoldszahl

$$Re' = \delta' u_{\infty} \rho_{\infty} / \mu_w$$

vom Parameter des Einblasens b aufgetragen. Die Messungen wurden bei drei verschiedenen Turbulenzgradwerten (0,2 %, 5 %, 11 %) durchgeführt. Bei Verwirbelung der äußeren Strömung im Bereich von 0,2 % bis 11 % erhöht sich der Parameter des Einblasens um das 1,5fache. Bei unterkritischem Einblasen drückt sich der Einfluß der äußeren Turbulenz in einer wesentlichen Zunahme der Wandreibung aus. Der Reibungskoeffizient wurde aus den experimentell ermittelten Profilen der mittleren Geschwindigkeit nach der Methode von Klausser unter Verwendung des Stevenson-Gesetz für die turbulente Grenzschicht mit Einblasen an der Wand, bestimmt. Auf Bild 2a ist zu erkennen, daß die Werte für die Wandreibung an einer Platte sich gut mit Hilfe folgender Formel beschreiben lassen

$$\psi = (c_{fo\epsilon} / c_{fo0}) (1 - b/b_{\epsilon}^*)^2 \equiv K (1 - b/b_{\epsilon}^*)^2. \quad (1)$$

Diese wurde für niedrigturbulente Strömungen von S. S. Kutateladse und A. I. Leontev erhalten. In Formel (1) ist die äußere Turbulenz im kritischen Parameter des

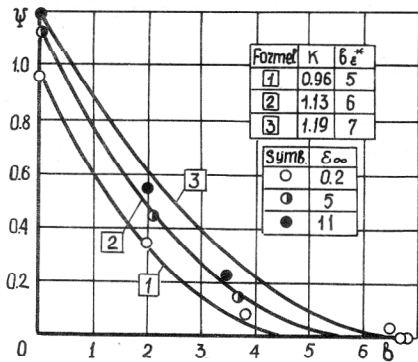


Bild 2a
Einfluß der äußeren Turbulenz auf die Reibung in der turbulenten Grenzschicht beim Einblasen

Einblasens berücksichtigt. Diesen kann man mit Hilfe der Näherungsformel

$$b_{\epsilon}^* / b_o^* = 1 + 3,8 \epsilon_{\infty} \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

berechnen. Dabei ist b_o^* der kritische Parameter des Einblasens in der schwachturbulenten Strömung. Auf Bild 2b sind die experimentellen Ergebnisse zum Wärmeaustausch dargestellt. Diese korrelieren gut mit den Reibungswerten. Die äußere Turbulenz verstärkt den Wärmeaustausch und den kritischen Wärmeparameter des

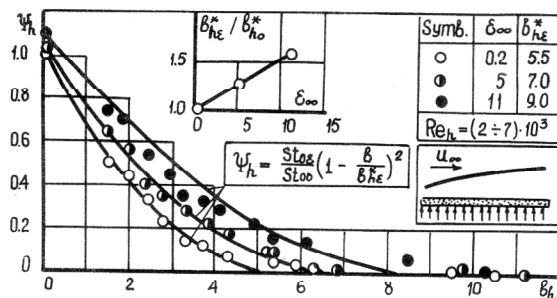


Bild 2b
Einfluß der äußeren Turbulenz auf den Wärmeaustausch in der turbulenten Grenzschicht beim Einblasen

Einblasens (bei einer Verwirbelung der äußeren Strömung bis auf 11 % vergrößert sich der kritische Wärmeparameter des Einblasens um das 1,6fache)

$$b_{h\epsilon}^* / b_{ho}^* = 1 + 5,7 \epsilon_{\infty} \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

$$\psi_h = (St_{o\epsilon} / St_{oo}) \left(1 - b_h / b_{h\epsilon}^*\right)^2 \quad (4)$$

Die Verwirbelung der äußeren Strömung führt zu einer Vergrößerung der Wärmeabgabe, d. h. zu einer Verschlechterung des Schutzes der porösen Wand mit Hilfe des Einblasens. Im Gebiet starken Einblasens ($b_h = 5$ bis 7) bei $\epsilon_{\infty} = 11$ % ist die Intensität der Wärmeabgabe um das Mehrfache größer als bei schwach turbulenter Umströmung. Wenn der Parameter des Einblasens verringert wird, so nimmt dieser Unterschied ab und für $b_h = 0$ bis $1,5$ beträgt der Wert 10 bis 30 %. Der sich verstärkende

Einfluß der Turbulenz der äußeren Strömung bei intensivem Einblasen auf die Reibung und den Wärmeaustausch an der durchlässigen Wand wirkt sich ebenfalls auf den Charakter des Wärmeaustauschs und die Effektivität des Schleiers hinter dem Abschnitt des porösen Einblasens aus. Bei relativ schwachem Einblasen und einem geringen Turbulenzgrad lassen sich die Werte der Untersuchungen zum Wärmeaustausch hinter dem Abschnitt des Einblasens gut mit Hilfe der Formel für nichtdurchlässige Flächen beschreiben:

$$St = 0,0128 Re_h^{-0,25} \cdot Pr^{-0,75} \quad (5)$$

Bei Zunahme des Einblasens ($\rho v_w / \rho_{\infty} u_{\infty} > 0,03$) verringert sich der Wärmeaustausch hinter der Strecke des Einblasens (ungefähr um das 2fache), was durch die Herausbildung eines spezifischen Wirbelgebietes bedingt ist. Jedoch in stark verwirbelten Strömungen kommt es durch die Verstärkung des Vermischens zur Zerstörung des Wirbelgebietes, eine Verringerung der Wärmeabgabe hinter dem porösen Abschnitt bei starkem Einblasen kann nicht beobachtet werden (Bild 3). Die Werte zur Effektivität des porösen Schleiers (Bild 4) beweisen die Verringerung der Schutzigenschaften des porösen Einblasens. Die angeführten Werte zeigen wesentliches Absinken (um das 2 bis 4fache) der Effektivität des porösen Schleiers bei erhöhter äußerer Turbulenz. Die Abweichung der experimentell ermittelten Punkte für die

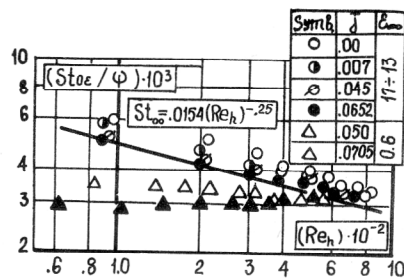


Bild 3
Intensität des turbulenten Wärmeaustauschs in der Zone des homogenen porösen Schleiers bei turbulent gemachter äußerer Strömung

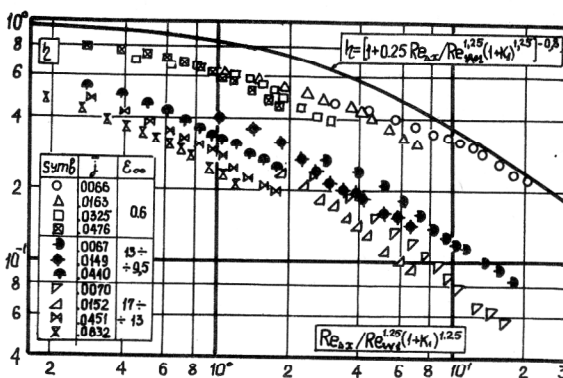


Bild 4
Effektivität des homogenen porösen Schleiers bei verschiedenen Turbulenzgradwerten für die Anströmung

schwach turbulente Strömung von der Formel von Kutaladse und Leontev beträgt

$$h = [1 + 0,25 \operatorname{Re}_{\Delta x} / \operatorname{Re}_{w1}^{1,25} (1 + K_1)^{1,25}]^{-0,8} \quad (6)$$

Hier sind $K_1 = (T_{w1} - T') / (T_{\infty} - T_{w1})$, T' die Temperatur des eingeblasenen Gases, T_{∞} Temperatur der Hauptströmung, T_{w1} Temperatur der Wand am Ende des porösen Abschnitts. Die Abweichung läßt sich mit der großen Länge der Einblasstrecke erklären.

Zur Verallgemeinerung der experimentellen Werte (Bild 4) kann man folgende empirische Formel vorschlagen

$$h = [1 + A (\epsilon_{\infty}, \bar{j}) F_1^{1,25}]^{-0,8} \quad (7)$$

Hier sind

$$A (\epsilon_{\infty}, \bar{j}) = \bar{j} (3,44 \epsilon_{\infty} + 16) + 12 \epsilon_{\infty} \cdot 10^{-2}$$

Die Beziehung (7) gilt für eine vorgegebene Länge des porösen Abschnitts.

Formelverzeichnis

$b = \frac{\rho_w v_w}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \frac{2}{c_{f00}}$	Parameter des Einblasens
b^*	kritischer Parameter des Einblasens, bei dem es zu einem Verdrängen der Grenzschicht kommt
c_{f00}	Reibungskoeffizient für die undurchlässige Platte in der schwach turbulenten Strömung
F_1	Abkürzung für $\operatorname{Re}_{\Delta x}^{0,8} / \operatorname{Re}_{w1} (1 + K_1)$ in der Formel (7)
Pr	Prandtlzahl
Re	Reynoldszahl
St	Stantonzahl
$\bar{j} = \frac{\rho_w v_w}{\rho_{\infty} v_{\infty}}$	relativer Massedurchsatz der eingeblasenen Luft

u, v	Längs- und Querkomponente der mittleren Geschwindigkeit
Δx	Abstand in Richtung der Strömung vom Abschnitt des Wärmeaustausches
δ'	Dicke der Verdrängungsschicht beim Einblasen
ϵ	Turbulenzgrad der Strömung in %
$\eta = (T_w - T_{w1}) / (T_{w2} - T_{\infty})$	Effektivität des porösen Schleiers
μ	dynamische Viskosität
ρ	Dichte
ψ	relative Reibungswärmeaustauschfunktion

$$\varphi = 4 / (\sqrt{T_w / T_{\infty}} + 1)^2 \quad \text{Funktion des nichtisothermen Verhaltens}$$

Verzeichnis der verwendeten Indizes:

b	Parameter des Einblasens
h	Wärmebedingungen
w	Wandbedingungen
w ₁	Wandbedingungen am Ende des porösen Abschnitts
∞	Parameter der Anströmung
ϵ	Bedingungen in der turbulent gemachten Strömung

LITERATUR

- [1] Миронов Б. П., Васечкин В. Н., Мамонов В. Н., Ярыгина Н. И. В кн.: Теплообмен — У1, т. 1, ч. 2, Минск, 1980 г., с. 155 — 166.
- [2] Миронов Б. П., Мамонов В. Н. В кн.: Турбулентный перенос со вдувом на поверхности. Новосибирск, 1980, с. 7 — 21.
- [3] Васечкин В. Н., Ярыгина Н. И. В кн.: Турбулентный перенос со вдувом на поверхности, Новосибирск, 1980, с. 22 — 39.

Anschrift der Verfasser:

Institut für Wärmephysik der
Akademie der Wissenschaften der UdSSR

Nowosibirsk-90
Prospekt Akademika Lawrentjewa