

Barnas, L.D. - Vsesojuznyj teplochničeskij institut (Wärmetechnisches Institut der Union)

Zur Analogie von Wärme- und Stoffaustausch.

Es werden die Bedingungen für das Bestehen einer Analogie von Wärme- und Stoffaustausch bei getrennten und gemeinsamen Verlauf dieser Prozesse erörtert; ein früher bereits vorgeschlagenes System von Ähnlichkeitskriterien wird ergänzt, und einige experimentelle Werte werden analysiert.

Die Analogie von Wärme- und Stoffaustausch, die vor ungefähr 40 Jahren zum ersten Male zur Lösung einer technischen Aufgabe benutzt wurde, ermöglichte es bekanntlicherweise, zu einer Reihe von Schlussfolgerungen zu gelangen, die heute in großem Maße und mit guten Ergebnissen sowohl bei wissenschaftlichen Forschungen als auch bei Lösungen vieler angewandter Aufgaben verwendet werden. In unserer Literatur [L. 1] jedoch wurde auch darauf hingewiesen, daß diese Analogie, die durch eine gleichartige Struktur der Differentialgleichungen der Wärme- und Stoffverteilung bedingt ist, in Wirklichkeit keine vollkommene ist, besonders nicht für heterogene Systeme, auf die sie häufig angewendet wird. Die Bedingungen, unter denen die Anwendung der sich aus ihr ergebenden Schlussfolgerungen zulässig ist, machen noch eine weitere Erörterung und Präzisierung erforderlich. Einer weiteren Untersuchung bedarf auch die damit zusammenhängende Frage des Systems der Ähnlichkeitskriterien für die jeweiligen Prozesse.

Eine richtige Lösung dieser Fragen ist um so wichtiger, als in der letzten Zeit eine Reihe von Arbeiten veröffentlicht wurden, die die früher gezogenen Schlussfolgerungen, und insbesondere die Stichhaltigkeit der in der Ingenieurpraxis vielfach angewendeten Berechnungsverfahren der Verdampfungskühlung, der Befeuchtung und Trocknung verschiedener Stoffe, der Verbrennung von festen und flüssigen Brennstoff in Zweifel zogen.

Wir untersuchen die Austauschprozesse in einem heterogenen System, das aus einer festen und einer flüssigen Oberfläche und einer sich längs dieser Fläche bewegenden Dampf-Gas-Strömung oder einer binären Gasströmung besteht. Der Einfachheit halber setzen wir eine ebene Strömung voraus.

Die Wärme- und Stoffübertragung entsteht in solch einem Fall im allgemeinen längs der Hauptbewegungsrichtung des Mittels durch molekulare und molare Erscheinungen. Die Undurchlässigkeit der Scheidenoberfläche für die inerte Komponente des Gemisches (z. B. für die Luft im Dampf-Luft-Gemisch bei Verdampfung und Kondensation oder für die nicht absorbierbare Komponente des Gas-Gemisches) führt bei isothermischem Stoffaustausch zum Auftreten einer zusätzlichen Strömung des Gemisches in Richtung z , die perpendicular zu Grundbewegungsrichtung verläuft. Hierbei fehlt eine resultierende Strömung der inertten Komponenten in der angegebenen Richtung der Oberfläche der Scheide (Trennung), und die Strömung der aktiven Komponente (Dampf, aktives Gas) wird stärker im Vergleich zu dem Falle, in dem nur Molekular- und Turbulenzdiffusion stattfindet. Bei gemeinsamem Verlauf von Wärme- und Stoffaustausch tritt außerdem der wechselseitige Einfluß dieser beiden Prozesse in Erscheinung: 1. wächst die Intensität der molekularen Stoffübertragung infolge der Diffusionswärmeleitung; 2. beeinflusst die summarische Stoffströmung in Richtung zur oder von der Scheidenoberfläche die hydrodynamischen Verhältnisse, von denen beide Prozesse abhängen, und verursacht eine Wärmeübertragung zusammen mit der Stoffübertragung neben der durch die Molekular- und Turbulenzwärmeleitung bedingten.

Im folgenden werden wir wie auch in der früheren Arbeit [L. 2] die Thermodiffusion und die Diffusionswärmeleitung unberücksichtigt lassen, was für eine große Anzahl praktischer Fälle gerechtfertigt ist, besonders bei einer kleinen Konzentration einer der Komponenten des Gemisches; aber wir werden versuchen, den Einfluß der übrigen Faktoren ein wenig ausführlicher zu berücksichtigen, als wir das früher getan haben.

Die Koeffizienten der molekularen Übertragung (der Wärmeleitung λ und der Diffusion D_p) verändern sich häufig in dem

Grenzen der jeweiligen Strömung verhältnismäßig wenig, was es erlaubt, sie in diesen Fällen im ganzen Volumen als unverändert zu betrachten. Im Unterschied dazu erfahren die Koeffizienten der Turbulenzübertragung (λ_m und $D_{p.m.}$) sogar in den Grenzen der jeweiligen Strömung infolge der Veränderung des Geschwindigkeitsgefälles, der Intensität und des Maßstabes der Turbulenz eine wesentliche Veränderung. Die bestehenden Darstellungen der Turbulenzwärmeleitung und der Turbulenzdiffusion erlauben es anzunehmen, daß bei einer Ähnlichkeit der hydrodynamischen Felder für alle Ähnlichen Punkte und bei Wärme- und Stoffübertragung im ganzen hydrodynamischen Feld für alle Punkte der jeweiligen Strömung für die lokalen Werte von λ_m und $D_{p.m.}$ die Beziehung

(1)

gilt, die nicht vom Maßstab und der Intensität der Turbulenzpulsationen abhängt.

Hierbei ist γ das spezifische Gewicht, c die Wärmeaufnahme-fähigkeit, R die Gaskonstante und T die Temperatur. Der Index n bezieht sich auf Dampf; die Größen ohne Index auf das ganze Gemisch.

In dem Falle, daß

(2)

oder, was das gleiche ist, $Pr = Pr_D$ (wobei a der Koeffizient der Temperaturleitung und Pr und Pr_D das Wärme- und Diffusionskriterium von Prandtl ist), bekommen wir aus (1) und (2):

(3)

Wenn man annimmt, daß die Bedingung (2) erfüllt wird, und diese Bedingung ist bekanntlicherweise eine der Hauptbedingungen für die Existenz einer Analogie von Wärme- und Stoffaustausch bei erzwungener Bewegung des Mittels, kann man, wenn man die Gleichung (3) berücksichtigt, von der Betrachtung der Bedingungen für die laminare Strömung ausgehen, indem man die gewonnenen Ergebnisse auch für die Bedingungen der stabilisierten Turbulenzströmung des Mittels anwendet.

Die Gleichungen für die Bewegung, die Wärmeleitung, die Diffusion und den Austausch an der Grenze für getrennt verlaufende stationäre Wärme- und Stoffaustauschprozesse sind auf Tabelle 1 aufgeführt, wo neben den früher genannten folgende Bezeichnungen gelten: w Geschwindigkeit; p Dampf; ρ Dichte; α, β die Koeffizienten des Wärme- und Stoffaustausches; ν der Koeffizient der kinematischen Viskosität; F die Hebekraft; $g_n = w_n \gamma_n$ die Strömungsdichte des Stoffes (Dampf, aktives Gas); der Index 2 bezieht sich auf inertes Gas. Die Gleichungen für den Stoffaustausch wurden hier unter Berücksichtigung der Bedingungen eines heterogenen Systems aufgestellt¹. Sie unterscheiden sich von den entsprechenden Gleichungen für den reinen Wärmeaustausch dadurch, daß beim Stoffaustausch neben der Diffusionsströmung des Stoffes (Dampf oder aktives Gas) noch eine zusätzliche Strömung auftritt, die durch die Undurchlässigkeit der Scheidenoberfläche für inertes Gas bedingt ist, sowie durch den Einfluß der summarischen (Diffusions- und konvektiven) Stoffströmung in Richtung n auf das Geschwindigkeitsfeld. Der Einfluß der besagten Faktoren kommt in den Gleichungen der Bewegung (A_2) und der Diffusion (B_2) durch zusätzliche Glieder zum Ausdruck, die die Größe der Strömungsdichte des Stoffes $w_n \gamma_n$ einschließen, und in der Gleichung des Austausches an der Scheidengrenze (B_2) durch den Faktor² p/p_{inert} .

Aus Tabelle 1 folgt, daß im Unterschied zu den gewöhnlich betrachteten Gleichungen für homogene Systeme die Gleichungen der Wärme- und Stoffausbreitung für heterogene Systeme im allgemeinen nicht gleich aufgebaut sind und daß außerdem die hydrodynamischen Verhältnisse an der Grenze für getrennt verlaufende Wärme- und Stoffaustauschprozesse verschieden sind. Daran denkt man gewöhnlich in erster Linie, wenn man von der Existenz einer nur annähernden Analogie von Wärme- und Stoffaustausch spricht. Die wichtigsten Voraussetzungen für die Existenz einer solchen Analogie für getrennt verlaufende Prozesse sind außer der geometrischen Ähnlichkeit der Systeme:

- a) eine kleine Konzentration der aktiven Komponenten (Dampf, aktives Gas) im Gemisch und eine geringe Differenz ihrer Partialdrücke $A p_n$, bei denen man in den Gleichungen (A_2) und (B_2) die zusätzlichen Glieder, die $w_n \gamma_n$ enthalten, und in der Gleichung (B_2) den Unterschied der Größe p/p_{inert} von eins³ unberücksichtigt lassen kann;

b) die Befriedigung der Gleichheit (2) in allen ähnlichen Punkten oder im Mittelwert für beide Ströme (wenn die Veränderung der physikalischen Parameter in ihren Grenzen nicht groß ist);

c) die Ähnlichkeit der Randbedingungen (für stationäre Prozesse die Ähnlichkeit der Bedingungen in den ursprünglichen Strömungsquerschnitten und der Verteilung der Parameter in der Scheideneoberfläche),

Die Gleichungen für den Fall, daß Wärme- und Stoffaustausch gleichzeitig und gemeinsam verlaufen, sind aus Tabelle 2 zu ersehen. Da bei ungleichförmigem Temperaturfeld der Stoffstrom auch der Wärmeträger ist, erscheinen in den diesen Fall entsprechenden Gleichungen der Wärmeleitung (δ_3) und des Wärmeaustausches ^{an der Grenze} (B_3) zusätzliche Glieder, die ϱ, ν enthalten.

Die Gleichungen für den Stoffaustausch jedoch sind, soweit die Thermodiffusion nicht berücksichtigt wird, die gleichen wie für isothermische Verhältnisse (Tabelle 1); sie sind hier nur in eine Form gebracht, die den entsprechenden Gleichungen für den Wärmeaustausch näherkommt.

Die Gleichung für die Bewegung ($A_{3,4}$) ist für gemeinsam verlaufende Prozesse die gleiche, und einer der wesentlichen Gründe dafür, daß die zur Erörterung stehende Analogie verletzt wird - nämlich die unterschiedlichen hydrodynamischen Verhältnisse beim Wärme- und Stoffaustausch -, entfällt in diesem Fall.

Aus den Übertragungsgleichungen (δ_3) und (δ_4), die in der Struktur einander ähnlicher sind als die Gleichungen (δ_1) und (δ_2), sowie aus den Gleichungen (B_3) und (B_4) folgt außer der Bedingung (2) noch eine Bedingung für die Existenz einer Analogie (der Ähnlichkeit der Temperaturfelder und der partialen Drucke) für gemeinsam verlaufende Prozesse:

$B =$

(4)

wobei $\varepsilon_n = \gamma_n / \gamma$ der Dampfgehalt (des aktiven Gases) ist, bezogen auf das Gesamtgewicht des Gemisches;

und $x = \gamma_n / \gamma_2$ das gleiche, bezogen auf das Gewicht von inerten Gas (z. B. der Feuchtigkeitsgehalt des Gases).

Bei $\epsilon_n \neq 1$ kann man streng genommen die Bedingung (4), die durch den Einfluß der Stoffströmung auf die beiden zur Erörterung stehenden Prozesse bedingt ist, nicht erfüllen. Das folgt schon daraus, daß die in einem heterogenen System entstehende zusätzliche, über die molekulare Stoffübertragung hinausgehende Stoffübertragung nur durch eine (die konvektive) Komponente der transversalen Strömung bedingt ist, während die zusätzliche Wärmeübertragung bei gemeinsamem Ablauf der Prozesse durch beide Komponenten (die Diffusions- und die konvektive Komponente) der transversalen Stoffströmung bestimmt wird. Für eine Reihe von Gemischen, die in der Industriepraxis angewendet werden, sind jedoch die Abweichungen nicht nur von Bedingung (2), sondern auch von Bedingung (4) verhältnismäßig gering. So haben wir z. B. für das weit verbreitete Gemisch von Luft und Wasserdampf

$\frac{D_p}{R_n T} \approx 0,9$, und die Größe B , die bei $\epsilon_n = 1$ gleich eins ist, strebt zu ihrem größten Wert - ungefähr 1,2 - bei $\epsilon_n \rightarrow 0$.

Wenn man von Einschränkungen absieht, die bei bestimmten Bedingungen durch die Unstetigkeit der physikalischen Parameter des Mittels auftreten können, folgen aus den Gleichungen, die auf Tabelle 2 aufgeführt sind, keine zusätzlichen Bedingungen für die Existenz einer annähernden Analogie von sich gemeinsam vollziehenden Wärme- und Stoffaustauschprozessen außer der Forderung der Ähnlichkeit der Randbedingungen und der Forderung der Erfüllung der Gleichungen (2) und (4). Speziell für diesen Fall besteht nicht die Forderung, daß die Glieder der Differentialgleichungen, die $w_n \gamma_n$ enthalten, im Verhältnis zu den anderen Gliedern dieser Gleichungen so klein sein müssen, daß man sie unberücksichtigt lassen kann. So muß offensichtlich die annähernde Analogie für sich gemeinsam vollziehende Wärme- und Stoffaustauschprozesse in einem größeren Bereich der Veränderung der Betriebsverhältnisse gewahrt sein, und nicht nur bei den oben genannten für getrennt verlaufende Prozesse.

In Anlehnung an die Gleichungen, die auf Tabelle 1 aufgeführt sind, kann man zu folgenden Kriterienabhängigkeiten für die Wärme- und Stoffaustauschkoeffizienten bei getrenntem Verlauf

dieser Prozesse kommen:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \text{ und} \tag{5}$$

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \dots, p/p) \text{ oder} \tag{6}$$

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \dots). \tag{6a}$$

Gleichung (6) schließt außer den drei üblichen Bestimmungskriterien noch drei zusätzliche Kriterien ein: das Kriterium π_{∞} , das den Einfluß der gesamten Stoffströmung in Richtung der Normalen n auf die hydrodynamischen Verhältnisse berücksichtigt, und die Kriterien π_D und p/p_2 , die den Einfluß der konvektiven Stoffströmung, die durch das Vorhandensein einer Scheide (Trennung) der Oberfläche hervorgerufen wird, auf das Partialdruckfeld, d. h. auf die Bedingungen der Stoffverteilung und auf die Bedingungen an der Grenze berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die meisten Autoren, die die Kriteriengleichung für den Stoffaustausch in einem heterogenem System zu vervollständigen suchten, dabei nur von Gleichung (B₂), d. h. von der Stephängleichung ausgingen. Das führte lediglich zum Austausch von Nu_D durch $Nu_D^* = Nu_D \frac{\rho_2}{\rho}$. Ein derartiger Ersatz ist jedoch für Verhältnisse, bei denen der Einfluß der transversalen Stoffströmung wesentlich ist, völlig unzulänglich, weil hierbei der Einfluß der konvektiven Stoffströmung auf das Partialdruckfeld nur teilweise berücksichtigt wird, während der Einfluß der gesamten Stoffströmung auf das Geschwindigkeitsfeld überhaupt nicht berücksichtigt wird.⁴

Bei Erfüllung der oben genannten Bedingungen für die Existenz einer annähernden Analogie von getrennt verlaufendem Wärme- und Stoffaustausch können die zusätzlichen Kriterien aus Gleichung (6) herausgelassen werden, und sie geht in die Gleichung über, die (5) analog ist,

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D), \tag{7}$$

wobei die Art der Funktionen von f in den Gleichungen (5) und (7) gleich ist. Diese Tatsache ermöglicht es auch, bei gewis-

sen Bedingungen die Ergebnisse der Versuche für den Wärmeaustausch auf den Stoffaustausch zu übertragen und umgekehrt. Die in diesen Gleichungen entsprechend der gewählten Arbeitsmethode unterschiedliche Form des Kriteriums, das die Hubkraft berücksichtigt, spielt in diesem Fall keine Rolle, weil für den reinen Wärmeaustausch $Gr = Ar$ gilt.

Wir werden uns jetzt nur noch einem Umstand zuwenden, der sich auf die Austauschprozesse bei freier Bewegung bezieht. Bekanntlich kann im letzteren Fall das Re-Kriterium aus den Gleichungen (5) und (7) ausgeschlossen werden, während die beiden übrigen Kriterien durch ihr Produkt ersetzt werden; d. h. die Gleichungen sehen dann folgendermaßen aus:

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \tag{8a}$$

$$Nu_D = f(Ar \cdot Pr_D). \tag{8b}$$

Die Verallgemeinerung einer großen Anzahl von Versuchswerten für den Wärmeaustausch bei freier Bewegung, die von M.A. Micheev [L. 4] vorgenommen wurde, zeigte, daß für verschiedene Gase und Tropfenflüssigkeiten bei $Pr \geq 0,7$ die Form der Funktion von f in Gleichung (8a) nicht von der Größe Pr abhängt, sondern nur durch das Produkt $Gr \cdot Pr$ oder $ArPr$ bestimmt wird.

Eine eindeutige Abhängigkeit von Nu_D von dem Produkt $ArPr_D$ bei verschiedenen Werten von Pr_D (auf jeden Fall bei $Pr_D \geq \sim 0,7$) wurde in letzter Zeit auch für den Stoffaustausch [L. 5] festgestellt [L. 5]. Das zeigt, daß man für Fälle der freien Bewegung eines Mittels bei nicht zu kleinen Pr und Pr_D aus den oben genannten Bedingungen für die Existenz einer annähernden Analogie von Wärme- und Stoffaustausch Gleichung (2) ausschließen kann, indem man sie durch die Bedingung $Ar \cdot Pr = Ar \cdot Pr_D$ ersetzt.

Die auf Tabelle 2 aufgeführten Gleichungen für sich gemeinsam vollziehende Prozesse führen zu folgenden Kriterienabhängigkeiten:

$$Nu = f(Re, Ar, Pr, \dots), \tag{9}$$

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \dots), \tag{10}$$

oder, wenn man die zusätzlichen Kriterien umwandelt,

$$Nu = f(Re, Ar, Pr, \dots); \tag{9a}$$

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \dots). \tag{10a}$$

Die Gleichungen (9) und (9a) beziehen sich nur auf den Wärmeaustausch, der sich gemeinsam mit dem Stoffaustausch vollzieht und unterscheiden sich von Gleichung (5) dadurch, daß sie drei zusätzliche Kriterien einschließen: das Kriterium π_w , das hier die gleiche Bedeutung hat wie in Gleichung (6), und das Kriterium π_m oder π_m^* , oder $\frac{c_n}{c}$ und $\frac{\Delta T}{T}$, die den Einfluß der Wärmeübertragung durch den Dampf (aktives Gas) auf das Temperaturfeld berücksichtigen. Der Simplex $\frac{c_n}{c}$ ging in diese Gleichungen ein (zusammen mit π_m oder in expliziter Form) zusammen mit Pr, das die Wärmeaufnahme-fähigkeit des Gemisches c einschließt, infolge der Tatsache, daß sich die zusätzliche Wärmeübertragung in Richtung n nicht durch das Gemisch vollzieht, sondern durch den Dampf mit der Wärmeaufnahme-fähigkeit c_n . Wenn man die Wärmeübertragung mit bewegtem ^{Gemisch} in die anderen Richtungen (bei ebener Strömung in Richtung X) unberücksichtigt läßt und nur die Wärmeübertragung durch den Stoff in Richtung n berücksichtigt, können die beiden Kriterien Pr und $\frac{c_n}{c}$ durch ihr Produkt $Pr \frac{c_n}{c}$ ersetzt werden.

Die Gleichungen (10) und (10a), die wie auch (6a) Modifikationen von Gleichung (6) sind, beziehen sich in dem gleichen Maße, wie sie sich auf den isothermischen Stoffaustausch beziehen, auch auf den Stoffaustausch, der sich gemeinsam mit dem Wärmeaustausch vollzieht⁵. Wenn man lediglich die Stoffübertragung in Richtung n berücksichtigt, kann man in Gleichung (10a) auch die beiden Kriterien Pr und $\frac{R_n}{R}$ durch ihr Produkt ersetzen.

Wenn die Bedingungen für die Existenz einer Analogie (2) und (4) mit hinreichender Annäherung erfüllt sind, d. h. wenn $Pr \approx Pr_D$ und $\frac{c_n}{c} \approx \frac{R_n}{R}$ und die Randbedingungen ähnlich sind, dann gilt kraft der Ähnlichkeit der Temperaturfelder und der Partialdrucke auch $\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{\Delta p_n}{p_n}$. Da ja die Art der Funktionen von f in den Gleichungen (9) und (10) in diesem Fall gleich sein soll, gilt für $Nu \approx Nu_D$. Hier muß man darauf aufmerksam machen, daß bei Existenz einer annähernden Analogie der gemeinsamen Prozesse die Kriteriengleichungen nicht unbedingt wie im Falle getrennter Prozesse in die Form von (5) und (7) gebracht werden, sondern die zusätzlichen Kriterien, die den Einfluß der gesamten und konvektiven Stoffströmung berücksichtigen, enthalten können.

Dank der Tatsache, daß hier in die Ausgangsgleichungen keine Vereinfachungen eingeführt wurden, wie sie in [L. 2] vorgenommen wurden, ist das gewonnene System der Ähnlichkeitskriterien auch noch vollständiger. Es schließt das Kriterium $\frac{\Delta T}{T_c}$ ein, das in dem speziellen Fall der adiabatischen Verdampfung in das Kriterium übergeht, das für diese Bedingungen von A. A. Guchman [L. 6] vorgeschlagen wurde:

$$Gu = \frac{T_c - T_H}{T_c},$$

wobei T_c und T_H die absoluten Temperaturen des Dampf-Gas-Gemisches nach einem Trocken- und einem Taupunktthermometer sind.

Wenn man für die adiabatische Verdampfung das Kriterium π_{10} durch $K = \frac{\tau}{c \Delta T}$ ersetzt (s. [L. 2]), erhält man anstelle von (9a)

$$Nu = f(Re, Ar, Pr, K, \frac{c_p}{c}, Gu), \tag{11}$$

und bei Existenz einer annähernden Analogie (d. h. Pr und $\frac{c_p}{c}$):

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, K, \frac{c_p}{c}, Gu). \tag{12}$$

Das Kriterium Gu ist dabei nicht das einzige Kriterium, wie man bisweilen annimmt, sondern eine von drei Kriterien, die den Einfluß der Stoffströmung berücksichtigen; das nimmt ihm aber nicht die Bedeutung eines parametrischen Kriteriums.

Wir wollen nicht weiter auf Vereinfachungen der Gleichungen (9) und (10) oder (9a) und (10a) eingehen, die häufig auch dann möglich sind, wenn $\omega_2 \gamma_2$ nicht zu klein ist, damit die Anwendung der Gleichungen (5) und (7) gerechtfertigt ist, und nur im Zusammenhang mit der oben gegebenen Analyse einiger Versuchswerte werden wir die Vereinfachung der Gleichungen (11) und (12) erörtern.

In [L. 2] wurde schon bemerkt, daß im allgemeinen Fall (d. h. wenn die Möglichkeit der Anwendung der Kriteriengleichungen unabhängig von den am Prozess beteiligten Stoffen angenommen werden kann) das Kriterium K , das unter anderem die Wärme der Phasenumwandlung r einschließt, nicht durch das Kriterium Gu ersetzt werden kann. Nur wenn man die adiabatische Verdampfung bei gegebenen Komponenten des Dampf-Gas-Gemisches ($\tau \approx \text{const.}$) und gegebenem und hinreichend engem Veränderungsbereich seiner absoluten Temperatur ($T_c \approx \text{const.}$) betrachtet, können die Kriterien K und Gu

beide annähernd als $\frac{\Delta T}{const.}$ dargestellt werden, weshalb eins von beiden (es ist gleich, welches) aus der Kriteriengleichung ausgeschlossen werden kann. Wenn man noch den Einfluß des Simplex unberücksichtigt läßt, was zulässig ist für den Fall, daß er sich nur wenig ändert, z. B. bei geringem Dampfgehalt im Gemisch, kann man für den Fall der erzwungenen Bewegung zu den vereinfachten Gleichungen der Art

$$Nu = f(Re, Pr, Ga) \text{ und}$$

$$Nu_D = f(Re, Pr_D, Ga)$$

übergehen.

Der Einfluß der in [L. 2] und in dieser Arbeit gewonnenen zusätzlichen Kriterien, die den Einfluß der Stoffströmung auf die Bedingungen des Wärme- und Stoffaustausches berücksichtigen, kann bei bestimmten Bedingungen wesentlich sein. Wenn das tatsächlich zutrifft, ist die Auswertung der experimentellen Werte in Form der Gleichungen (5) und (7) nicht gerechtfertigt und kann zum Mißerfolg führen, wie das bei O'Brien und Stutzman [L. 7] der Fall war, die die Versuchsergebnisse zur Verdampfung einer Reihe von Flüssigkeiten mit stark unterschiedlichen Eigenschaften in Luft durch eine allgemeine Gleichung vom Typ (7) beschreiben wollten.

In den Fällen, da die Intensität der Stoffströmung relativ klein ist, ist die Einführung zusätzlicher Kriterien nicht erforderlich oder wird durch die unvermeidliche Ungenauigkeit der Versuchswerte nicht gerechtfertigt. Letzteres bezieht sich in der Regel auf die in der Praxis verbreiteten Bedingungen (Atmosphärendruck, Temperatur bis zu 80-90° C) der Verdampfung von Wasser in Luft, der Kondensation oder Sorption von geringer Menge in Luft vorhandenem Wasserdampf. In diesen Fällen des gemeinsamen Verlaufs von Wärme- und Stoffaustausch führt die normale Auswertung der Versuchswerte in Form von Gleichungen vom Typ (5) und (7) größtenteils zu Abweichungen der Werte von Nu und Nu_D untereinander und der Werte von Nu und Nu_D und der Werte der entsprechenden Kriterien für den reinen Wärmeaustausch oder den isothermischen Stoffaustausch, und zwar zu Abweichungen von 3-7% bis zu 15-20%, was der Größenordnung nach den vergleichbaren experimentellen Ausgangswerten nahekommt.

Als Bestätigung für die Existenz einer nahen Analogie von Wärme- und Stoffaustausch bei freier Bewegung kann eine Gegenüberstellung der von M.A. Micheev [L. 4] erarbeiteten Werte für den reinen Wärmeaustausch und der entsprechenden Werte für den Stoffaustausch dienen.

Die vorliegenden experimentellen Werte für den Stoffaustausch bei freier Bewegung werden gut durch die übliche Formel

$$Nu_D = C (ArPr_D)^{0,25} \quad (13)$$

beschrieben, wobei nach Belter [L. 8] für den Stoffaustausch bei Verdampfung von einer horizontalen Wasserfläche in Luft (kreisförmiges Gefäß mit einem Durchmesser von 0,3 m, Wassertemperatur 17 - 94° C, $ArPr_D = 1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$) $C = 0,643$ und nach Wilke [L. 5] für den isothermischen Stoffaustausch von einer vertikalen Fläche bei der Elektrolyse von Kupfer und Silber und bei einer Lösung fester Benzoin- und Salizilsäure in Wasser ($ArPr_D = 1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$ und $Pr_D = 400 - 80000$) $C = 0,66$.

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, führte das Vorhandensein einer Stoffströmung, die sich mit der freien Bewegung des Mittels überlagert, beim Stoffaustausch in einem großen Veränderungsreich von $ArPr_D$ und Pr_D nicht zu einer wesentlichen Verletzung der Analogie. Die Größen Nu und Nu_D weichen für die horizontale Fläche (punktirierte Linien) nur um ungefähr 8% voneinander ab, für die vertikale Fläche (durchgehende Linie) um 17%. In dem einen Fall ist Nu_D kleiner als Nu , im anderen größer, was die Möglichkeit, diese Ergebnisse mit dem Einfluß der Dampfströmung auf die Intensität des Stoffaustausches zu erklären, ausschließt und vielmehr von verschiedenen Fehlern und verschiedenen Bedingungen der Versuchsdurchführung zeugt.

In der vor kurzem veröffentlichten Arbeit von A.V. Nesterenko [L. 9] wurde für den Stoffaustausch bei Verdampfung von Wasser unter den Bedingungen der freien Bewegung von Luft ($ArPr_D = 1 \cdot 10^6 - 0,7 \cdot 10^8$) die Formel

$$Nu_D = 0,665 (ArPr_D)^{0,248} \quad (14)$$

vorgeschlagen, die bei $C = 0,643$ mit der Formel (13) übereinstimmt, aber weniger zweckmäßig ist infolge der nicht mit der möglichen Genauigkeit der experimentellen Werte gerechtfertig-

ten Substitution des Exponenten 0,25 durch 0,248.

Von dem gleichen Autor wurde für den besagten Fall der Verdampfung von Wasser auch die Abhängigkeit für den Wärmeabgabekoeffizienten vorgeschlagen:

$$Nu = 4,67 (GrPr)^{0,104} \quad (15)$$

Soweit sich diese Formel auf den Wärmeaustausch bezieht, der sich gemeinsam mit dem Stoffaustausch vollzieht, müßte man natürlich das Kriterium Ar und nicht Gr einführen. Aber diese notwendige Präzisierung kann die vorgeschlagene Abhängigkeit für diese Bedingungen und besonders die Größe des Exponenten auf ihrer rechten Seite, der nur ungefähr 0,1 beträgt, was um das 2,5-fache kleiner ist als sein gewöhnlicher Wert von 0,25, nicht wesentlich ändern.

Den wesentlichen Unterschied zwischen den Formeln (14) und (15) erklärt der Autor mit dem Einfluß des Stoffaustausches auf den Wärmeaustausch und stützt sich hierbei darauf, daß seine Messungen das Fehlen einer Ähnlichkeit der Temperaturfelder und der Dampfkonzentrationen über der Flüssigkeitsfläche feststellten⁶. Formel (15) wie auch Formel (14) soll seiner Meinung nach noch das Kriterium Ga enthalten, dessen Einfluß jedoch nach den Bedingungen der Versuchsdurchführung nicht im einzelnen bestimmt werden konnte.

Diese Erklärungen kann man jedoch nicht als ausreichend anerkennen. Die oben erwähnte befriedigende Übereinstimmung der experimentellen Werte für den Stoffaustausch bei freier Bewegung mit den entsprechenden Werten für die reine Wärmeabgabe (Abb. 1) zeigen, daß keine wesentlichen Abweichungen von der Ähnlichkeit der Temperaturfelder und der Partialdrucke vorhanden sind in den Fällen, da man das erwarten müßte, und es bleibt unverständlich, warum sie nach den Angaben von A.V. Neseterenko für ein Gemisch wie feuchte Atmosphärenluft mit geringem Wasserdampfgehalt so groß war wie für Prozesse, die sich in einem hydrodynamischen Feld vollziehen.

Es bleibt ebenso unerklärlich, warum das Auftreten des Stoffaustausches zu einer Verringerung des Einflusses der freien Bewegung des Gemisches auf die Intensität des Wärmeaustausches und zu einer wesentlichen Verkleinerung der absoluten Werte des

Wärmeaustauschkoeffizienten (oder Nu) im Vergleich zum reinen Wärmeaustausch bei den gleichen Bedingungen führen könnte. Bei $GrPr = 4 \cdot 10^7$ z. B. ist die Größe Nu nach Nesterenko um das 2,1-fache kleiner als nach Micheev (Abb. 2), obgleich der Autor von der Vorstellung ausgeht, daß bei gleichzeitigem Ablauf der beiden Prozesse der Wärmeaustausch intensiver wird.

In der Arbeit von A.V. Nesterenko wurden keine experimentellen Werte aufgeführt, die die von ihm vorgeschlagenen Formeln für den Fall der freien Bewegung bestätigen. Der Umstand, daß seine Werte für den Stoffaustausch nach Formel (14) mit den Ergebnissen vorausgegangener Untersuchungen, darunter auch Untersuchungen des reinen Wärmeaustausches übereinstimmen, die Werte für den Wärmeaustausch nach Formel (15) jedoch stark von den Ergebnissen aller anderen experimentellen Untersuchungen abweichen, läßt die Richtigkeit der Formel (15) stark bezweifeln. In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, daß die in dieser Arbeit angewendete Methode der Bestimmung von Nu und Nu_D nach der bedingten Dicke der Grenzschicht, die nach der mit Hilfe psychometrischer Thermoelemente gemessenen Verteilung der Temperatur- und Partialdrucke an der Oberfläche bestimmt wird, nicht als hinreichend zuverlässig erachtet werden kann. Diese Methode bringt ein subjektives Element in die Auswertung der experimentellen Werte und kann zu wesentlichen Fehlern führen, besonders bei freier Bewegung des Gemisches. Aus den oben genannten Gründen sind auch die Schlußfolgerungen, die in der Arbeit von A.V. Nesterenko gezogen worden sind, darunter auch die bezüglich des Fehlens der Analogie von Wärme- und Stoffaustausch unter den Bedingungen seiner Versuche, nicht hinreichend begründet, und seine experimentellen Werte bedürfen noch einer genauen Prüfung und weiteren Erklärung.

Letzteres bezieht sich auch auf die Arbeit von M.K. Andreeva [L. 10], die den Wärme- und Stoffaustausch bei freier Bewegung beim Prozess der Stoffbefeuchtung untersucht (die Arbeitsmodelle waren aus Asbest und waren $9 \cdot 10$ cm groß und 0,95 cm stark; die Lufttemperatur betrug $19 - 43^\circ$ C, $Ar \cdot Pr_D = 0,5 \cdot 10^4 - 0,8 \cdot 10^5$). Andreeva führte ebenfalls irrtümlicherweise das Kriterium Gr anstelle von Ar in die Abhängigkeit für den Wärmeaustausch ein und schlug folgende Formeln vor:

$$Nu = \quad \quad \quad (16)$$

$$Nu_D = \quad \quad \quad (17)$$

wobei γ und γ_0 die absolute Feuchtigkeit an der Oberfläche des Stoffes und der gesättigten Luft ist bei ihrer Temperatur an der Oberfläche. Die Größe $\varphi_n = \frac{\gamma}{\gamma_0}$ betrug bei den Versuchen 0,45 bis 0,6.

M.K. Andreeva erhielt für Nu und Nu_D verhältnismäßig gut übereinstimmende Abhängigkeiten, wobei in beiden Formeln der Exponent bei $Gr \cdot Pr$ und $Ar \cdot Pr_D$ ungefähr um das 4-fache größer war als der übliche. Interessant ist, daß sie in diesem Teil den Resultaten von Nesterenko entgegengesetzte Ergebnisse erhielt und buchstäblich die gleichen Argumente anführt wie letzterer, um das Abweichen seiner Versuchsergebnisse von denen anderer zu erklären; und zwar erklärt er es mit dem Einfluß des Stoffaustausches auf den Wärmeaustausch und damit, daß die Gleichungen noch das Kriterium Ga enthalten müßten, dessen Einfluß jedoch nach der Meinung von Andreeva durch die Kriterien Gr und Ar berücksichtigt wird.

Die Versuchsergebnisse von M.K. Andreeva haben jedoch auch Ähnlichkeit mit denen von Nesterenko. Sie brachten ebenfalls für den untersuchten Bereich für $Gr \cdot Pr$ (genauer $Ar \cdot Pr$) Werte für das Wärmekriterium Nu , die wesentlich geringer sind als die in den Versuchen für reinen Wärmeaustausch (Abb. 2), was der Behauptung des Autors dieser Arbeit "der Koeffizient des Wärmeaustausches bei Vorhandensein des Stoffaustausches ... ist größer als der Koeffizient des Wärmeaustausches ohne Stoffaustausch" [L. 10] widerspricht. Der Grund dafür, daß man bei diesen Versuchen ungewöhnlich hohe Werte für den Exponenten von $GrPr$ und $Ar \cdot Pr_D$ und gleichzeitig niedrige absolute Werte für Nu und Nu_D erhielt, kann unter anderem der Umstand gewesen sein, daß diese Versuche bei nichtstationären Verhältnissen gemacht wurden. Offensichtlich soll das zusätzliche Argument in den Gleichungen, die die Ergebnisse dieser Versuche beschreiben, nicht das Kriterium Ga sein (soweit sie bei nichtadiabatischen Verhältnissen durchgeführt wurden) oder ein anderes Kriterium, das den in diesem Fall schwachen Einfluß der Stoffströmung berücksichtigt, sondern das Kriterium Fo , das den Einfluß der nichtstationären Verhältnisse

des Prozesses berücksichtigt. Für diese Vermutung sprechen die experimentellen Werte von B.D. Kacnel'son und F.A. Timofeeva.

Mit der Frage der Existenz einer Analogie von Wärme- und Stoffaustausch bei erzwungener Bewegung des Mittels beschäftigen sich viele experimentelle Arbeiten (Ja.M. Rubinstejn, D.N. Vyrubov, I.I. Paleev und A.A. Sumilin, I.M. Fedorov, M. Jakob und viele andere sowjetische und ausländische Autoren), die bei den unterschiedlichsten Bedingungen durchgeführt wurden. Auf diese Arbeiten, die bei den oben genannten Bedingungen die Existenz einer annähernden Analogie von Wärme- und Stoffaustausch bestätigen, können wir aus räumlichen Gründen nicht weiter eingehen; wir werden uns nur noch auf die bereits oben erörterte Arbeit von A.V. Nesterenko beziehen, die auch in diesem Teil unstrittene Thesen enthält, die der Tendenz des Autors, das Fehlen einer Analogie bei der Verdampfung von Wasser in Luft zu beweisen, Ausdruck geben.

Die Versuche von Nesterenko zur Verdampfung von Wasser bei erzwungener Bewegung der Luft wurden im Unterschied zu den Versuchen mit freier Bewegung bei adiabatischen Verhältnissen durchgeführt. Auf Grund dieser Versuche (Verdampfung von Wasser aus einem kreisförmigen Gefäß, das in die untere Wand eines rechtwinkligen Kanals eingelassen ist, durch die Luft geblasen wurde), sowie der Versuche anderer Autoren schlug er für den Bereich Re 6000 bis 70000 die Formeln

$$\begin{aligned} & ; \quad (18) \\ & \quad (19) \end{aligned}$$

vor.

Wie wir sehen, ging der Verfasser von der Negation der Analogie aus und nahm bei der Auswertung der experimentellen Werte für Nu und Nu_D verschiedene Abhängigkeiten an (s. auch Abb. 3). Jedoch auch die von ihm für einen Betriebszustand aufgeführten Werte der Verteilung der relativen Werte der Temperaturen und Konzentrationen an der Oberfläche der Flüssigkeit bei erzwungener Bewegung der Luft zeigen keine Abweichungen voneinander, die über die Grenzen der Meßfehler hinausgehen. Wenn man das und die Tatsache berücksichtigt, daß die Anwendung des Kriteriums Ga in Gleichung (19) als einziges zusätzliches Argument, das den Ein-

fluß der konvektiven Stoffströmung berücksichtigt, selbst bei adiabatischen Verhältnissen nur bei Ähnlichkeit der Temperaturfelder und der Partialdrucke zulässig ist, kann man das unterschiedliche Aussehen der Funktionen (besonders die verschiedenen Exponenten bei Re) in den Formeln (18) und (19) kaum als gerechtfertigt betrachten. Das Abweichen der durch diese Formeln beschriebenen mittelnden Kurven zeugt viel eher von dem unterschiedlichen Genauigkeitsgrad der für den Wärme- und Stoffaustausch gewonnenen experimentellen Werte.

Wesentlich ist der Umstand, daß der Einfluß des Kriteriums G_u ebenfalls in den Grenzen der Ungenauigkeit der experimentellen Werte von A.V. Nesterenko liegt. Deshalb kann man die Notwendigkeit der Einführung des genannten Kriteriums für die Bedingungen seiner Versuche und die vorgeschlagene quantitative Abhängigkeit von Nu und Nu_D von G_u noch nicht als hinreichend von ihnen bestätigt betrachten. Als Bestätigung dafür können auch nicht die von Nesterenko in seiner Arbeit verwendeten Ergebnisse anderer Autoren gelten. Er gibt in seiner Arbeit [L. 9] keine Quellen für die benutzten experimentellen Werte an, aber man kann sich leicht davon überzeugen, daß die Literaturwerte für die Verdampfung von einer horizontalen Fläche von Wasser, Benzin, Toluol, Propylalkohol und Azeton der schon erwähnten Arbeit von O'Brien und Stutzman entnommen wurden. Die Versuche dieser Autoren wurden jedoch nicht bei adiabatischen Verhältnissen durchgeführt, sondern größtenteils bei Verhältnissen, die isothermischen nahekamen. Bei ihrer Durchführung wurde die Temperatur der Flüssigkeit - ausgenommen die Versuche mit Azeton - mit Hilfe eines elektrischen Erwärmers nach Möglichkeit der Lufttemperatur angeglichen (die Differenz der Flüssigkeits- und Lufttemperatur wurde bei den Versuchen größtenteils in den Grenzen von 0 bis ca. $8^{\circ} C$ gehalten). Deshalb lassen sie nicht auf den Einfluß des Kriteriums G_u schließen, ganz abgesehen davon, daß für die Bedingungen dieser Versuche (nichtadiabatische Verhältnisse, Flüssigkeiten mit stark unterschiedlichen Merkmalen) die Einführung nur eines zusätzlichen Temperaturkriteriums für die Gewinnung einer allgemeinen Abhängigkeit, die den Einfluß der Dampfströmung auf die Intensität des Wärme- und Stoffaustausches berücksichtigt, unzureichend ist.

Hier ist noch zu ergänzen, daß die quantitative Abweichung der Versuchsergebnisse der genannten Autoren von den Berechnungsergebnissen nach Formel (19) ziemlich beträchtlich ist, obgleich die experimentelle Anlage von A.V. Nesterenko nach dem gleichen Schema aufgebaut war wie die Anlage, an der die anderen Autoren ihre Versuche durchführten. Die Ergebnisse, die sie bei der Verdampfung von Wasser erhielten, sind auf Abb. 4 dargestellt, wobei hier als Bestimmungsgröße bei den Kriterien Nu_D und Re der hydraulische Durchmesser des Kanals genommen wurde. Die gleichen Werte, allerdings unter Einführung der Länge des Gefäßes als Bestimmungsgröße von uns umgerechnet, wie das früher Nesterenko bei der Auswertung seiner Versuche tat, sind auf Abb. 3 (Kurve 2) dargestellt. Wie wir sehen, betragen in diesem Bereich der Re -Werte, in dem die vergleichbaren Werte auf den vorliegenden Versuchen beruhen, die Abweichungen nach Nu_D durchschnittlich ungefähr 40%.

Wenig Überzeugend sind auch die Bemühungen von A.V. Nesterenko, allgemeine Kurven zu erhalten, die die Abhängigkeiten $Nu/Pr^{0,33}Gu^{0,175}$ und $Nu_D/Pr^{0,33}Gu^{0,135}$ von Re bei erzwungener Bewegung für eine ebene, innerhalb eines Kanals gelegene Fläche, eine Zylinder-, Kugel- und eine Tropfenfläche ausdrücken, und auf Grund dessen Formeln für den Wärme- und Stoffaustausch vorzuschlagen, die den Bereich Re von 1 bis 70000 erfassen und für alle genannten Oberflächenformen (im jeweiligen Re -Bereich) gleich sind unabhängig von dem Betriebszustand, bei denen die anfänglichen Versuche durchgeführt wurden, - dank der Einführung des Kriteriums Gu . Unserer Meinung nach entspricht eine derartige Anwendung dieses Kriteriums nicht der Bedeutung, die es nach Ansicht von A.A. Guchman, der es einführte, haben sollte, und kann nicht für richtig erachtet werden.

Schließlich ist noch zu bemerken, daß die Überbewertung des Einflusses des Stoffaustausches auf den Wärmeaustausch bei der Verdampfung von Wasser und die in den oben genannten und einigen anderen Arbeiten in letzter Zeit vorgebrachten Behauptungen, daß eine Analogie von Wärme- und Stoffaustausch überhaupt nicht vorhanden sei, bei einer Reihe von Lesern dieser Arbeiten bereits nicht richtige Vorstellungen hervorgerufen haben. So werden z. B. unter diesem Einfluß bisweilen ohne hinreichende Begründung die auf dieser Analogie beruhenden Berechnungsverfahren einiger Ap-

parate angezweifelt, darunter auch die von Klimaanlage, die mit feuchter oder trockener Luft bis zu 30 - 35° C und bei hinreichend kleinen Feuchtigkeitsgehalten arbeiten.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Infolge des Einflusses der Stoffströmung auf die Geschwindigkeits- Temperatur- und Partialdruckfelder besteht keine vollständige Analogie zwischen Wärme- und Stoffaustausch, aber sowohl bei getrenntem als auch bei gemeinsamem Verlauf dieser Prozesse existieren Bedingungen, unter denen man den Einfluß der Faktoren, die die Analogie beeinträchtigen, unberücksichtigt lassen kann. In diesen Fällen, die in der Praxis häufig vorkommen, ist die Anwendung der Schlüsse, die sich aus der Existenz einer annähernden Analogie von Wärme- und Stoffaustausch ergeben und die die Lösung vieler praktischer Aufgaben wesentlich erleichtern, völlig zulässig. Das gilt besonders für die Verdampfungskühlung einer Flüssigkeit, für viele Fälle der Trocknung und Kühlung feuchter Gase, der Verbrennung von flüssigem und festem Brennstoff usw.

2. Für gemeinsam verlaufende Wärme- und Stoffaustauschprozesse muß der Bereich, in dem die annähernde Analogie von beiden gewahrt bleibt, größer sein als bei getrennt verlaufenden Prozessen und kann auch für die Bedingungen gelten, bei denen die Stoffströmung schon relativ groß ist. Im letzteren Fall müssen die Kriterienabhängigkeiten sowohl für den Stoffaustausch als auch für den Wärmeaustausch zusätzliche Kriterien einschließen, die den Einfluß der Stoffströmung berücksichtigen.

3. Die vorliegenden experimentellen Werte sind größtenteils eine gute Bestätigung dafür, daß bei bestimmten Bedingungen eine annähernde Analogie von Wärme- und Stoffaustausch existiert. Einige in letzter Zeit veröffentlichte experimentelle Arbeiten, in denen die Autoren zu einer Überbewertung des Einflusses der Faktoren kamen, die die Ähnlichkeit der Temperatur- und Partialdruckfelder bei der Verdampfung von Wasser und der Sorption von Wasserdampf aus feuchter Luft beeinträchtigen, brachten widersprüchliche Ergebnisse, die nicht als hinreichend zuverlässig gewertet werden können.

4. Eine Untersuchung des quantitativen Einflusses der Stoffströmung auf die Intensität des Wärme- und Stoffaustausches für die Fälle, bei denen er wirklich groß ist, bleibt Aufgabe weiterer Untersuchungen.

ERLÄUTERUNGEN

¹ Diese Gleichungen, ebenso wie die Gleichungen für den Wärme- und Stoffaustausch, die unten auf Tabelle 2 aufgeführt werden, sind vollständiger als in [L. 2]; insbesondere wird hier nicht die in [L. 2] gemachte Annahme für die Grenzschicht eingeführt, daß $w_n \gamma_n = \text{const.}$ und $q = \text{const.}$

² Das bedeutet nicht, daß die Dichte der Stoffströmung in Richtung n in diesem Fall um das $p/p_{2.0}$ -fache wächst, verglichen mit dem Fall der homogenen Diffusion, denn bei Vorhandensein einer Trennoberfläche verändert sich auch der Wert des Gradienten $\partial p_n / \partial n$.

³ Der Ausdruck, der in Gleichung (5₂) links in geraden Klammern steht, fällt in diesem Fall nach der Bedingung der Unzertrennbarkeit vollkommen aus der Gleichung (gleich Null).

⁴ Letzteres wurde auch in der jüngst erschienenen Arbeit von Spalding [L. 3] nicht berücksichtigt, der für den Stoffaustausch bei erzwungener Bewegung folgende Abhängigkeit vorschlug:

(20)

⁵ In diesen Gleichungen wie auch in (6a) kann das Kriterium π_w durch $\frac{4p_w}{\rho}$ ersetzt werden, aber wir werden das nicht tun, weil der Simplex $\frac{4p_w}{\rho}$ im Falle des Wärmeaustausches kein Analogon hat.

⁶ Für den Fall des nichtisothermischen Stoffaustausches müßte man streng genommen dem Temperaturfeld nicht das Feld der Konzentrationen, sondern das Feld der Partialdrucke des Dampfes gegenüberstellen.

⁷ Eine solche Betriebsweise ist nur bei der Verdampfung möglich.

T a b e l l e 1. Sich getrennt vollziehende Wärme- und Stoffaustauschprozesse.

<u>Prozess</u>	<u>Wärmeaustausch</u>	<u>Stoffaustausch</u>
----------------	-----------------------	-----------------------

Bewegungsgleichungen

Wärmeleitungs- und Diffusionsgleichungen

Gleichungen für das Gleichgewicht an der Trennung (Scheide)

T a b e l l e 2. Sich gemeinsam vollziehende Wärme- und Stoffaustauschprozesse.

Spalten wie in Tab. 1.

* Die Gleichung (5₄) setzt voraus, daß man die Veränderung von R in Richtung x überücksichtigt lassen kann.

A b b i l d u n g 1. Abhängigkeiten für $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ und $Nu_D = f(Ar \cdot Pr_D)$ bei freier Bewegung.

1 - reine Wärmeabgabe (nach Mischev); 2 - Stoffabgabe (nach Wilkie u.a.); 3 - Stoffabgabe (nach Belter u.a.).

A b b i l d u n g 2. Abhängigkeiten für $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ bei freier Bewegung.

1a und 1b - reine Wärmeabgabe (nach Mischev); 2 - Wärmeabgabe bei der Verdampfung (nach Nesterenko); 3 - Wärmeabgabe bei Befuchtung des Stoffes (nach Andreeva).

A b b i l d u n g 3. Abhängigkeiten von $Nu = f(Re)$ und $Nu_D = f(Re)$ für die Verdampfung von Wasser aus einem runden Gefäß in einem rechtwinkligen Kanal bei erzwungener Bewegung der Luft.

1 - nach Formel (18) und Formel (19); 2 - nach den Versuchen von O'Brien und Stutzman (Bestimmungsgröße ist der Durchmesser des Verdampfungsgefäßes).

A b b i l d u n g 4. Abhängigkeit von $Nu_D = f(Re)$ für die Verdampfung von Wasser (Versuche von O'Brien und Stutzman; Bestimmungsgröße ist der hydraulische Durchmesser des Kanals).

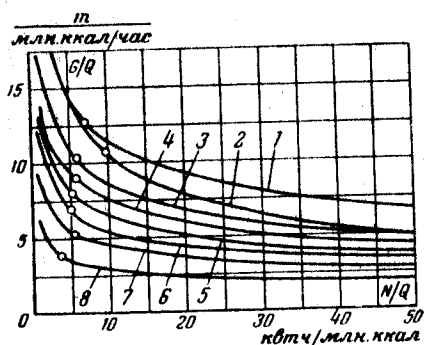
L i t e r a t u r

1. Rubinstejn, Ja.M.: Izvestija VTI (1935) Nr 12.
2. Berman, L.D.: Teploenergetika (1954) Nr 5.
3. Spalding, D.S.: Proc. Inst. Mech. Eng. (London) (1954) Nr 19.
4. Micheev, M.A.: Osnovy teploperedaci. Gosenergoizdat 1949.
5. Wilke, C. u.a.: Chem. Eng. Progr. (1953) Nr 12.
6. Guchman, A.A.: Teploenergetika (1954) Nr 5.
7. O'Brien, L.O. und L. Stutzman: Ind. Eng. Chem. (1950) Nr 6.
8. Boelter, L. u.a.: Ind. Eng. Chem. (1946) Nr 6.
9. Nesterenko, A.V.: ZTF (žurnal techničeskoj fiziki) (1954) Nr 4.
10. Andreeva, M.K.: ZTF (1954) Nr 11.

Anmerkung des Übersetzers:

Die richtige Schreibweise der Autoren Wilke [L.5] und Boelter [L.8], die aus der russischen Transkription nicht eindeutig hervorgeht, wurde erst nachträglich bei der Abschrift des Literaturverzeichnisses festgestellt, sodaß im Text leider eine falsche Schreibweise benutzt wurde, so Belter statt Boelter und Wilkie statt Wilke. Ich bitte das zu entschuldigen.

13. XII. Klasse.



Фиг. 9. Весовые характеристики стальных экономайзеров; обозначения кривых те же, что и на фиг. 8.

жению и далее при уменьшении диаметра труб и относительного продольного шага существенно улучшаются, что определяется ростом коэффициента компактности ϕ , коэффициента теплоотдачи α и уменьшением загрязнения труб. Так, например, пучок труб $d = 28$ мм, $s_1/d = 2$ и $s_2/d = 1,0$ (кривые 8), рекомендованный как самообдувающийся [Л. 6], требует в 2,7 раза меньше металла, в 5,7 раза компактнее, чем обычно применяемые экономайзеры из труб $d = 38$ мм шахматного расположения ($s_1/d = 2,5$ и $s_2/d = 2$, кривые 3).

Коридорные пучки при одинаковом расходе энергии на тягу вследствие большей склонности их к загрязнению по всем показателям приблизительно на 25% менее выгодны, чем соответствующие шахматные пучки (кривые 2 и 3).

Результаты технико-экономического сравнения экономайзерных поверхностей различного профиля показывают целесообразность широкого использования в котельных агрегатах самообдувающихся малогабаритных пучков труб $d = 28-32$ мм с шахматным расположением при $s_1/d = 2-2,5$ и $s_2/d = 1,0-1,5$. Применение самообдувающихся пучков позволяет экономить металл и снижать потери с уходящими газами.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Невский. „Известия ВТИ“ № 3, 1935.
2. Н. В. Кузнецов. Статья в Сборнике под редакцией С. Я. Корниченко. „Работы по методике расчета и конструирования котельного оборудования“. Госэнергоиздат, 1938.
3. В. О. Фогель. „Электрические станции“ № 1, 1946.
4. Н. В. Кузнецов и Э. С. Карасина. „Теплоэнергетика“ № 6, 1954.
5. Н. В. Кузнецов, А. З. Щербаков, Е. Я. Титова. „Теплоэнергетика“ № 9, 1954.
6. Н. В. Кузнецов и А. З. Щербаков. „Теплоэнергетика“ № 1, 1954.
7. Э. С. Карасина. Диссертация. ВТИ, 1951.
8. Н. В. Кузнецов. „Теплоэнергетика“ № 4, 1955.

ОБ АНАЛОГИИ МЕЖДУ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНОМ

Доктор техн. наук Л. Д. БЕРМАН
Всесоюзный теплотехнический институт

Аналогия между тепло- и массообменом, впервые использованная для решения технической задачи около 40 лет назад, позволила, как известно, прийти к ряду выводов, широко и плодотворно используемых в настоящее время как при научных исследованиях, так и решениях многих прикладных задач. В нашей литературе [Л. 1], однако, отмечалось и то, что эта аналогия, вытекающая из одинаковой структуры дифференциальных уравнений распространения тепла и вещества, не является в действительности полной, особенно для гетерогенных систем, на которые она часто распространяется. Условия, при которых использование вытекающих из нее выводов является допустимым, требуют еще дальнейшего рассмотрения и уточнения. Нуждается в дальнейшей разработке и связанный с этим вопрос о системе критериев подобия для рассматриваемых процессов.

Правильное решение этих вопросов является тем более важным, что в последнее время опубликован ряд работ, ставящих под сомнение сле-

Рассматриваются условия существования аналогии между тепло- и массообменом при раздельном и совместном протекании этих процессов; дополняется предложенная для них ранее система критериев подобия и разбираются некоторые опытные данные.

данные ранее выводы, и, в частности, обоснованность получивших широкое применение в инженерной практике методов расчета испарительного охлаждения, увлажнения и сушки различных ве-

ществ, горения твердого и жидкого топлива.

Рассмотрим процессы обмена в гетерогенной системе, состоящей из твердой или жидкой поверхности и движущегося вдоль нее потока парогазовой или бинарной газовой смеси. Ради простоты будем предполагать поток плоским.

Перенос тепла и вещества в таком потоке вызывается в общем случае помимо основного направленного движения среды молекулярными и молярными явлениями. Непроницаемость поверхности раздела для инертного компонента смеси (например, воздуха в паровоздушной смеси при испарении и конденсации или неабсорбируемого компонента газовой смеси) приводит при изотермическом массообмене к появлению дополнительного конвективного потока смеси в направлении n , перпендикулярном к основному направлению движения. При этом результирующий поток

инертного компонента в указанном направлении у поверхности раздела отсутствует, а поток активного компонента (пара, активного газа) возрастает по сравнению со случаем, когда имеет место только молекулярная и турбулентная диффузия. При совместном протекании тепло- и массообмена проявляется, кроме того, взаимное влияние этих процессов друг на друга: во-первых, возрастает интенсивность молекулярного переноса вещества в результате термодиффузии и переноса вещества в результате диффузионной теплопроводности; во-вторых, суммарный поток вещества в направлении к поверхности раздела или от нее отражается на гидродинамических условиях, от которых зависят оба процесса, а также вызывает перенос тепла вместе с веществом помимо обусловленного молекулярной и турбулентной теплопроводностью.

В дальнейшем мы будем, как и в прежней работе [Л. 2], пренебрегать термодиффузией и диффузионной теплопроводностью, что справедливо для большого числа практических случаев, особенно при малой концентрации одного из компонентов смеси, но попытаемся несколько полнее, чем это было сделано нами раньше, учесть влияние остальных факторов.

Коэффициенты молекулярного переноса (теплопроводности λ и диффузии D_p) часто изменяются в пределах данного потока сравнительно мало, что позволяет в таких случаях считать их неизменными во всем объеме среды. В отличие от этого коэффициенты турбулентного переноса (λ_m и $D_{p,m}$) значительно изменяются даже в пределах данного потока вследствие изменения градиента скорости, интенсивности и масштаба турбулентности. Существующие представления о механизме турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии позволяют принять, что при

подобии гидродинамических полей для всех сходственных точек, а при переносе тепла и вещества в общем гидродинамическом поле для всех точек данного потока между локальными значениями λ_m и $D_{p,m}$ сохраняется соотношение

$$\frac{\lambda_m}{D_{p,m}} = \gamma c R_n T, \quad (1)$$

не зависящее от масштаба и интенсивности турбулентных пульсаций.

Здесь γ , c , R , T — соответственно удельный вес, теплоемкость, газовая постоянная и температура. Индекс n относится к пару; величины без индекса — ко всей смеси.

В случае, когда

$$a = \frac{\lambda}{\gamma c} = D_p R_n T, \quad (2)$$

или, что то же, $Pr = Pr_D$ (где a — коэффициент температуропроводности; Pr и Pr_D — тепловой и диффузионный критерии Прандтля), получаем из (1) и (2):

$$\frac{\lambda}{D_p} = \frac{\lambda_m}{D_{p,m}}. \quad (3)$$

Полагая условие (2) выполненным, а это условие является, как известно, одним из основных для существования аналогии между тепло- и массообменом при вынужденном движении среды, можно, принимая во внимание равенство (3), исходить из рассмотрения условий ламинарного течения, применяя полученные результаты и для условий стабилизированного турбулентного течения среды.

Уравнения движения, теплопроводности, диффузии и обмена на границе для отдельно протекающих стационарных процессов тепло- и массообмена приведены в табл. 1, где помимо указан-

Таблица 1. Раздельно протекающие процессы тепло- и массообмена

Процесс	Теплообмен	Массообмен
Уравнения движения	$\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} \right) + F \quad (A_1)$	$\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} + w_n \frac{\rho_n}{\rho} \frac{\partial \omega}{\partial n} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} \right) + F \quad (A_2)$
	Критерии подобия $Re; Ar$ (или Gr)	$Re; Ar; \pi_w = \frac{g_n l}{\nu \gamma} = \frac{Nu_D}{Pr_D} \frac{\Delta p_n}{p} \frac{R}{R_n}$
Уравнения теплопроводности и диффузии	$\omega \frac{\partial T}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \right) \quad (B_1)$	$\omega \frac{\partial p}{\partial x} + w_n \frac{\gamma_n R_n T}{p} + \frac{p_n}{\gamma} \left[\frac{\partial (w \gamma)}{\partial x} + \frac{R_n}{R} \frac{\partial (w_n \gamma_n)}{\partial n} \right] =$ $= D_p R_n T \left(\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_n}{\partial n^2} \right) \quad (B_2)$
	Критерии подобия $Ge = Pr \cdot Re$	$Pe_D = Pr_D Re; \pi_D = \frac{g_n l}{D_p p} = Nu_D \frac{\Delta p_n}{p}$
Уравнения баланса на границе раздела	$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = \Delta T \quad (B_3)$	$-D_p \frac{p}{p_n} \left(\frac{\partial p_n}{\partial n} \right)_{n=0} = \beta p_n \Delta p_n \quad (B_4)$
	Критерии подобия Nu	$Nu_D^* = Nu_D \frac{p_n}{p}$

ных ранее приняты следующие обозначения: w — скорость; p — давление; ρ — плотность; α , β_p — коэффициенты тепло- и массоотдачи; ν — коэффициент кинематической вязкости; F — подъемная сила; $g_n = w_n \gamma_n$ — плотность потока вещества (пара, активного газа); индекс z относится к инертному газу. Уравнения для массообмена даны здесь с учетом особенностей условий гетерогенной системы¹. Они отличаются от соответствующих уравнений для чистого теплообмена вследствие появления при массообмене наряду с диффузионным потоком вещества (пара или активного газа) также и дополнительного его потока, вызванного непроницаемостью поверхности раздела для инертного газа, а также влияния суммарного (диффузионного и конвективного) потока вещества в направлении n на поле скоростей. Влияние указанных факторов отражается в уравнениях движения (A_2) и диффузии (B_2) дополнительными членами, включающими в себя величину плотности потока вещества $w_n \gamma_n$, а в уравнении обмена на границе раздела (B_2) — множителем² $\rho/p_{z,0}$.

Из табл. 1 следует, что в отличие от рассматриваемых обычно уравнений для однородных систем уравнения распространения тепла и вещества для гетерогенных систем оказываются, вообще говоря, построенными неодинаково, и, кроме того, гидродинамические условия и условия на границе также оказываются для раздельно протекающих процессов тепло- и массообмена различными. Это главным образом и имеют обычно в виду, когда говорят о существовании лишь приближенной аналогии между тепло- и массообменом. Основными условиями существования такой приближенной аналогии для раздельно протекающих процессов, кроме геометрического подобия систем, являются:

- а) малая концентрация активного компонента (пара, активного газа) в смеси и малая разность его парциальных давлений Δp_n , при которых можно пренебречь в уравнениях (A_2) и (B_2) дополнительными членами, содержащими $w_n \gamma_n$, и в уравнении (B_2) отличием величины $\rho/p_{z,0}$ от единицы³;
- б) удовлетворение во всех сходственных точках или в среднем для обоих потоков (когда из-

¹ Эти уравнения, как и уравнения для тепло- и массообмена, приведенные ниже в табл. 2, написаны более полно, чем в [Л. 2]; в частности, здесь не вводится принятое в [Л. 2] для пограничного слоя допущение, что $w_n \gamma_n = \text{const}$ и $q = \text{const}$.

² Это не означает, что плотность потока вещества в направлении n возрастает в рассматриваемом случае в $\rho/p_{z,0}$ раз сравнительно со случаем однородной диффузии, так как при наличии поверхности раздела изменяется также значение градиента dw_n/dn .

³ Выражение, стоящее в уравнении (B_2) слева в прямых скобках, при этом полностью выпадает (равно нулю) по условию неразрывности.

менение физических параметров в их пределах невелико) равенства (2);

в) подобие краевых условий (для стационарных процессов — подобие условий в начальных сечениях потоков и распределения параметров по поверхности раздела).

Уравнения для случая, когда тепло- и массообмен протекают одновременно и совместно, приведены в табл. 2. Так как при неравномерном поле температур поток вещества является также и носителем тепла, в отвечающих этому случаю уравнениях теплопроводности (B_3) и теплообмена на границе (B_3) появляются дополнительные члены, содержащие $w_n \gamma_n$. Уравнения же для массообмена, поскольку термодиффузия не учитывается, те же, что и для изотермических условий (табл. 1), они только преобразованы здесь к виду, более близкому соответствующим уравнениям для теплообмена.

Уравнение движения ($A_{3,4}$) является для совместно протекающих процессов общим, и одна из существенных причин нарушения рассматриваемой аналогии — различие гидродинамических условий при теплообмене и массообмене — в данном случае отпадает.

Из уравнений переноса (B_3) и (B_4), более близких между собой по структуре, чем уравнения (B_1) и (B_2), а также из уравнений (B_3) и (B_4) вытекает, кроме условия (2), еще одно условие существования аналогии (подобия полей температур и парциальных давлений) для совместных процессов:

$$B = \frac{c_n}{c} \frac{R}{R_n} = \frac{(1 - \epsilon_n) \frac{R_c}{R_n} + \epsilon_n}{(1 - \epsilon_n) \frac{c_c}{c_n} + \epsilon_n} = \frac{\frac{R_c}{R_n} + x}{\frac{c_c}{c_n} + x} = 1, \quad (4)$$

где $\epsilon_n = \gamma_n / \gamma$ — содержание пара (активного газа), отнесенное к общему весу смеси;
 $x = \gamma_n / \gamma_z$ — то же, отнесенное к весу инертного газа (например, влагосодержание газа).

При $\epsilon_n \neq 1$ выполнить условие (4), обусловленное влиянием потока вещества на оба рассматриваемых процесса, строго говоря, нельзя. Это следует уже из того, что возникающий в гетерогенной системе добавочный, сверх молекулярного, перенос вещества определяется только одной (конвективной) составляющей поперечного потока, тогда как добавочный перенос тепла при совместном протекании процессов определяется обеими (диффузионной и конвективной) составляющими поперечного потока вещества. Однако для ряда смесей, применяющихся в промышленной практике, отклонения не только от условия (2), но и от условия (4) оказываются сравнительно небольшими. Так, например, для широко распространенной смеси воздуха и водяного пара имеем $\frac{a}{D_p R_n T} \approx 0,9$, а величина B , рав-

Таблица 2. Совместно протекающие процессы тепло- и массообмена

Процесс	Теплообмен	Массообмен
Уравнение движения	$w \frac{\partial w}{\partial x} + w_n \frac{\rho_n}{\rho} \frac{\partial w}{\partial n} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial n^2} \right) + F \quad (A_{3,4})$	
	Критерии подобия Re, Ar, π_w	
Уравнения теплопроводности и диффузии	$w \frac{\partial T}{\partial x} + w_n \frac{\gamma_n}{\gamma} \frac{c_n}{c} \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{T}{\gamma} \left[\frac{\partial (w\gamma)}{\partial x} + \frac{c_n}{c} \frac{\partial (w_n \gamma_n)}{\partial n} \right] - a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \right) \quad (B_3)$	$w \frac{\partial p_n}{\partial x} + w_n \frac{\gamma_n}{\gamma} \frac{R_n}{R} \frac{\partial p_n}{\partial n} + \frac{p_n}{\gamma} \left[\frac{\partial (w\gamma)}{\partial x} + \frac{R_n}{R} \frac{\partial (w_n \gamma_n)}{\partial n} \right] - D_p R_n T \left(\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_n}{\partial n^2} \right) \quad (B_4^*)$
	Критерии подобия $Pe \text{ (или } Pr); \pi_m = \frac{g_n c_n l}{\lambda} = \pi_w Pr \frac{c_n}{c}$	$Pe_D \text{ (или } Pr_D); \pi_D = \pi_w Pr_D \frac{R_n}{R}$
Уравнения баланса на границе раздела	$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} + w_n \gamma_n c_n T_0 = \alpha \Delta T \quad (B_5)$	$-D_p \left(\frac{\partial p_n}{\partial n} \right)_{n=0} + w_n \gamma_n \frac{1}{p} p_{n0} = \beta_p \Delta p_n \quad (B_6)$
	Критерии подобия $Nu; \pi_m^* = \frac{g_n c_n l}{\lambda} \frac{T}{\Delta T} = \pi_m \frac{T}{\Delta T}$	$Nu_D; \pi_D^* = \frac{g_n l}{D_p p} \frac{p_n}{\Delta p_n} = \pi_D \frac{p_n}{\Delta p_n}$

* Уравнение (B₆) предполагает, что можно пренебречь изменением R в направлении x.

ная единице при $\epsilon_n = 1$, стремится к наибольшему ее значению — около 1,2 — при $\epsilon_n \rightarrow 0$.

Если не касаться ограничений, которые могут накладываться при известных условиях непостоянством физических параметров среды, то из уравнений, приведенных в табл. 2, никаких дополнительных условий для существования приближенной аналогии между совместно протекающими процессами тепло- и массообмена, кроме требования подобия краевых условий и требования удовлетворения равенств (2) и (4), не вытекает. В частности, в этом случае не возникает требования, чтобы содержащие $w_n \gamma_n$ члены дифференциальных уравнений были пренебрежимо малы по сравнению с другими членами этих уравнений. Таким образом, для совместно протекающих процессов тепло- и массообмена приближенная аналогия должна, по видимому, сохраняться в несколько более широких пределах изменения режима, а не только при условиях, указанных выше для раздельно протекающих процессов.

Руководствуясь уравнениями, приведенными в табл. 1, можно прийти к следующим критериальным зависимостям для коэффициентов тепло- и массоотдачи при раздельном протекании процессов:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (5)$$

и
$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \pi_w, \pi_D, p/p_2) \quad (6)$$

или
$$Nu_D = f\left(Re, Ar, Pr_D, \frac{\Delta p_n}{p}, \frac{R_n}{R}, \frac{p}{p_2}\right) \quad (6a)$$

Уравнение (6) включает в себя, кроме трех обычных определяющих критериев, еще три дополнительных критерия: критерий π_w , учитывающий влияние суммарного потока вещества в направлении нормали n на гидродинамические условия, и критерии π_D и p/p_2 , учитывающие влияние конвективного потока вещества, вызванного наличием поверхности раздела, на поле парциальных давлений, т. е. на условия распределения вещества и условия на границе.

Следует в связи с этим указать, что большинство авторов, пытавшихся дополнить критериальное уравнение для массообмена в гетерогенной системе, руководствовались при этом только уравнением (B₂), т. е. уравнением Стефана. Это

приводило лишь к замене Nu_D на $Nu_D^* = Nu_D \frac{p_2}{p}$.

Такая замена является, однако, для условий, когда влияние поперечного потока вещества значительно, совершенно недостаточной, так как при этом влияние конвективного потока вещества на поле парциальных давлений учитывается лишь частично, а влияние суммарного потока вещества на поле скоростей не учитывается вовсе⁴.

⁴ Последнее не учтено также в недавней работе Спалдинга [Л. 3], предложившего для массообмена при вынужденном движении зависимость вида:

$$\frac{Nu_D}{1 + \Lambda} = f(Re, Pr_D), \quad \text{где } \Lambda = \frac{\Delta p_n}{p_2 - p} \frac{R_n}{R}$$

При выполнении перечисленных выше условий существования приближенной аналогии между отдельно протекающими тепло- и массообменом дополнительные критерии могут быть исключены из уравнения (6) и оно переходит в уравнение, аналогичное (5),

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D), \quad (7)$$

причем вид функций f в уравнениях (5) и (7) оказывается одинаковым. Последнее и позволяет при известных условиях переносить результаты опытов по теплообмену на массообмен и обратно. Указанная в этих уравнениях в соответствии с принятой практикой различная форма критерия, учитывающего подъемную силу, в данном случае не играет роли, так как для чистого теплообмена $Gr = Ar$.

Мы обратим здесь внимание еще только на одно обстоятельство, относящееся к процессам обмена при свободном движении. Как известно, в последнем случае может быть исключен из уравнений (5) и (7) критерий Re , а остальные два критерия — заменены их произведением, т. е. уравнения приобретают вид:

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \quad (8a)$$

и

$$Nu_D = f(Ar \cdot Pr_D). \quad (8b)$$

Обобщение большого числа опытных данных по теплоотдаче при свободном движении, произведенное М. А. Михеевым [Л. 4], показало, что для различных газов и капельных жидкостей при $Pr \geq 0,7$ вид функции f в уравнении (8a) не зависит от величины Pr , а определяется только произведением $Gr \cdot Pr$ или $Ar \cdot Pr$.

Однозначная зависимость Nu_D от произведения $Ar \cdot Pr_D$ при различных значениях Pr_D (во всяком случае при $Pr_D \geq \sim 0,7$) установлена в последнее время и для массообмена [Л. 5]. Это показывает, что для случаев свободного движения среды при не слишком малых Pr и Pr_D можно исключить из перечисленных выше условий существования приближенной аналогии между тепло- и массообменом равенство (2), заменив его условием

$$Ar \cdot Pr = Ar \cdot Pr_D.$$

Уравнения, приведенные в табл. 2, для совместно протекающих процессов приводят к следующим критериальным зависимостям:

$$Nu = f(Re, Ar, Pr, \pi_w, \pi_m, \pi_m^*), \quad (9)$$

$$Nu_D = f(Re, Ar, Pr_D, \pi_w, \pi_D, \pi_D^*), \quad (10)$$

или, если преобразовать дополнительные критерии,

$$Nu = f\left(Re, Ar, Pr, \pi_w, \frac{c_n}{c}, \frac{\Delta T}{T}\right); \quad (9a)$$

$$Nu_D = f\left(Re, Ar, Pr_D, \pi_w, \frac{R_n}{R}, \frac{\Delta p_n}{p_n}\right). \quad (10a)$$

Уравнения (9) и (9a) относятся только к теплообмену, протекающему совместно с массообменом, и отличаются от уравнения (5) тем, что включают в себя три дополнительных критерия: критерий π_w , имеющий здесь тот же смысл, что и в уравнении (6), и критерии π_m и π_m^* , или $\frac{c_n}{c}$ и $\frac{\Delta T}{T}$, учитывающие влияние переноса тепла паром (активным газом) на поле температур. Симплекс $\frac{c_n}{c}$ вошел в эти уравнения (в составе π_m или явном виде) наряду с Pr , включающим в себя теплоемкость смеси c , вследствие того, что дополнительный перенос тепла в направлении n осуществляется не смесью, а только паром с теплоемкостью c_n . Если пренебречь переносом тепла с движущейся смесью в других направлениях (при плоском потоке в направлении X), а учитывать лишь перенос тепла веществом в направлении n , то два критерия Pr и $\frac{c_n}{c}$ могут быть заменены их произведением $Pr \frac{c_n}{c}$.

Уравнения (10) и (10a), являющиеся, как и (6a), видоизменениями уравнения (6), относятся в равной мере как к изотермическому массообмену, так и к массообмену, протекающему совместно с теплообменом⁵. Если принять во внимание перенос вещества только в направлении n , то в уравнении (10a) также можно заменить два критерия Pr и $\frac{R_n}{R}$ их произведением.

Когда условия существования аналогии (2) и (4) выполняются с достаточным приближением, т. е. $Pr \approx Pr_D$ и $\frac{c_n}{c} \approx \frac{R_n}{R}$, и краевые условия являются подобными, то в силу подобия при этом полей температур и парциальных давлений имеем также $\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{\Delta p_n}{p_n}$. Поскольку и вид функций f в уравнениях (9) и (10) должен быть в этом случае одинаков, то $Nu \approx Nu_D$. Здесь следует обратить внимание на то, что при существовании приближенной аналогии между совместными процессами критериальные уравнения не обязательно приводятся, как в случае отдельных процессов, к виду (5) и (7), а могут сохранять дополнительные критерии, учитывающие влияние суммарного и конвективного потоков вещества.

Благодаря тому, что в исходные уравнения здесь не введены некоторые упрощения, принятые в [Л. 2], полученная система критериев подобия также является более полной. Она вклю-

⁵ В этих уравнениях, как и в (6a), критерий π_w может быть заменен через $\frac{\Delta p_n}{p_n}$, но мы здесь этого не делаем, поскольку симплекс $\frac{\Delta p_n}{p_n}$ не имеет аналога в случае теплообмена.

чает в себя критерий $\frac{\Delta T}{T}$, переходящий для частного случая адиабатического испарения в критерий, предложенный для этих условий А. А. Гухманом [Л. 6]:

$$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c},$$

где T_c и T_m — абсолютные температуры парогазовой смеси по сухому и мокрому термометрам.

Если заменить для адиабатического испарения критерий π_w через $K = \frac{r}{c\Delta T}$ (см. [Л. 2]), то получим вместо (9а)

$$Nu = f\left(Re, Ar, Pr, K, \frac{c_n}{c}, Gu\right), \quad (11)$$

а при существовании приближенной аналогии (т. е. $Pr \approx Pr_D$, $\frac{c_n}{c} \approx \frac{R_n}{R}$ и $\frac{\Delta p_n}{p_n} \approx \frac{\Delta T}{T}$):

$$Nu_D = f\left(Re, Ar, Pr_D, K, \frac{c_n}{c}, Gu\right). \quad (12)$$

Критерий Gu оказывается при этом не единственным, как это иногда принимают, а одним из трех критериев, учитывающих влияние потока вещества. Это не лишает его и роли параметрического критерия.

Не останавливаясь на упрощениях уравнений (9) и (10) или (9а) и (10а), возможных часто и для условий, когда $w_n \gamma_n$ не настолько мало, чтобы было оправданным применение уравнений (5) и (7), коснемся лишь в связи с приводимым ниже анализом некоторых опытных данных — упрощения уравнений (11) и (12).

В [Л. 2] уже отмечалось, что в общем случае (т. е. когда предполагается возможность использования критериальных уравнений независимо от участвующих в процессе веществ) критерий K , включающий в себя помимо прочего теплоту фазового превращения r , не может быть заменен критерием Gu . Лишь когда рассматривается адиабатическое испарение при заданных компонентах парогазовой смеси ($\frac{r}{c} \approx \text{const}$) и заданном достаточно узком диапазоне изменения ее абсолютной температуры ($T_c \approx \text{const}$), критерии K и Gu могут быть оба приближенно представлены как $\frac{\Delta T}{\text{const}}$, вследствие чего один из них (безразлично какой) может быть исключен из критериального уравнения. Тогда, если прене-

бречь еще влиянием симплекса $\frac{c_n}{c}$, что допустимо, когда он слабо изменяется, например при малом содержании пара в смеси, можно прийти для случая вынужденного движения к упрощенным уравнениям вида

$$Nu = f(Re, Pr, Gu) \text{ и } Nu_D = f(Re, Pr_D, Gu). \quad (12)$$

Влияние полученных в [Л. 2] и в настоящей

работе дополнительных критериев, учитывающих влияние потока вещества на условия тепло- и массообмена, может быть при определенных условиях значительным. Когда это действительно так, обработка опытных данных в форме уравнений (5) и (7) является неправомерной и может приводить к неудаче, постигшей, например, О'Брайена и Штутцмана [Л. 7], попытавшихся описать одним общим уравнением типа (7) результаты опытов по испарению в воздухе ряда жидкостей с сильно различающимися свойствами.

В тех случаях, когда интенсивность потока вещества относительно невелика, введение дополнительных критериев не требуется или не оправдывается неизбежной неточностью опытных данных. Последнее относится, как правило, к распространенным на практике условиям (атмосферное давление, температура до 80—90°С) испарения воды в воздух, конденсации или сорбции содержащегося в воздухе в небольшом количестве водяного пара. В этих случаях совместного протекания тепло- и массообмена обычная обработка опытных данных в форме уравнений типа (5) и (7) приводит большей частью к расхождениям значений Nu и Nu_D между собой и со значениями соответствующих критериев для чистого теплообмена или изотермической массоотдачи от 3—7% до 15—20%, что близко по порядку величины к погрешностям сравниваемых между собой исходных опытных данных.

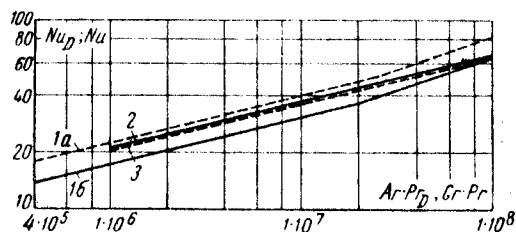
Подтверждением существования близкой аналогии между тепло- и массообменом при свободном движении может служить сопоставление опытных данных для чистого теплообмена, обработанных М. А. Михеевым [Л. 4], с соответствующими данными для массообмена.

Имеющиеся опытные данные для массоотдачи при свободном движении хорошо описываются обычной формулой

$$Nu_D = C (Ar Pr_D)^{0.25}, \quad (13)$$

где, по Бэлтеру [Л. 8], для массоотдачи при испарении в воздух с горизонтальной поверхности воды (круглый сосуд диаметром 0,3 м, температура воды 17—94°С, $Ar Pr_D = 1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$) $C = 0,643$ и, по Уилки [Л. 5], для изотермической массоотдачи с вертикальной поверхности при электролизе меди и серебра и растворении твердых бензойной и салициловой кислот в воде ($Ar Pr_D = 1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$ и $Pr_D = 400 - 80\,000$) $C = 0,66$.

Как показывает фиг. 1, наличие при массообмене потока вещества, накладывавшегося на свободное движение среды, не привело в широких пределах изменения $Ar Pr_D$ и Pr_D к значительному нарушению аналогии. Величины Nu и Nu_D расходятся между собой для горизонтальной поверхности (пунктирные линии) лишь примерно на 8%, а для вертикальной (сплошные линии) — на 17%. В одном случае Nu_D меньше, чем Nu , а в другом больше, что не позволяет



Фиг. 1. Зависимости $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ и $Nu_D = f(Ar \cdot Pr_D)$ при свободном движении.

1 — чистая теплоотдача (по Михееву); 2 — массоотдача (по Уилки и др.); 3 — массоотдача (по Вэлтеру и др.).

объяснить эти результаты влиянием потока пара на интенсивность массообмена, а говорит скорее о различных условиях проведения и погрешностях опытов.

В недавно опубликованной работе А. В. Нестеренко [Л. 9] предложена для массоотдачи при испарении воды в условиях свободного движения воздуха ($ArPr_D = 1 \cdot 10^6 - 0,7 \cdot 10^8$) формула

$$Nu_D = 0,665 (ArPr_D)^{0,248}, \quad (14)$$

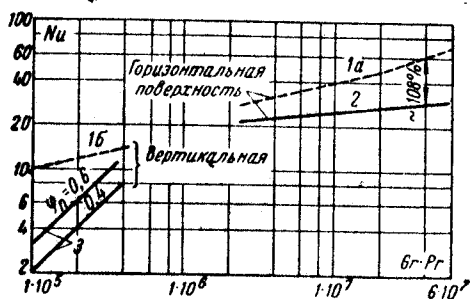
совпадающая с формулой (13) при $C = 0,643$, но менее удобная вследствие не оправдывающейся возможной точностью опытных данных замены показателя степени 0,25 на 0,248.

Тем же автором предложена для указанного случая испарения воды и зависимость для коэффициента теплоотдачи:

$$Nu = 4,67 (GrPr)^{0,101}. \quad (15)$$

Поскольку эта формула относится к теплообмену, протекающему совместно с массообменом, в нее надо было, конечно, ввести критерий Ar , а не Gr . Но это необходимое уточнение не может существенно изменить для рассматриваемых условий предложенную зависимость и, в частности, величину показателя степени в ее правой части, составляющего лишь около 0,1, что в 2,5 раза меньше обычного его значения 0,25.

Существенное различие формул (14) и (15) автор работы объясняет влиянием массообмена на теплообмен и ссылается при этом на то, что его измерения установили отсутствие подобия полей температур и концентраций пара над по-



Фиг. 2. Зависимости $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ при свободном движении.

1a и 1b — чистая теплоотдача (по Михееву); 2 — теплоотдача при испарении (по Нестеренко); 3 — теплоотдача при увлажнении материала (по Андреевой).

верхностью жидкости⁶. Формула (15), как и (14), должна, по его мнению, содержать еще критерий Gi , влияние которого не представилось, однако, возможным отдельно установить по условиям проведения опытов.

Эти объяснения нельзя, однако, признать достаточными. Отмеченное выше удивительное совпадение опытных данных по массоотдаче при свободном движении с соответствующими данными для чистой теплоотдачи (фиг. 1) свидетельствует об отсутствии существенных отклонений от подобия полей температур и парциальных давлений в тех случаях, когда этого естественнее было бы ожидать, и остается непонятным, почему же по данным А. В. Нестеренко оно оказалось столь большим для такой смеси, как влажный атмосферный воздух с малым содержанием водяного пара, и для процессов, совместно протекающих в общем гидродинамическом поле.

Не объяснено также, почему наличие массообмена могло привести к уменьшению влияния свободного движения смеси на интенсивность теплообмена и к значительному понижению абсолютных значений коэффициента теплоотдачи (или Nu) по сравнению с чистым теплообменом при тех же условиях. При $GrPr = 4 \cdot 10^7$, например, величина Nu по Нестеренко в 2,1 раза меньше, чем по Михееву (фиг. 2), тогда как автор работы исходит из представления о том, что при совместном протекании двух процессов теплообмен интенсифицируется.

В статье А. В. Нестеренко не приведены опытные данные, подтверждающие предложенные им формулы для случая свободного движения. То обстоятельство, что его данные по массоотдаче, судя по формуле (14), совпали с результатами предшествовавших исследований, в том числе и исследований чистого теплообмена, а данные по теплоотдаче, судя по формуле (15), резко разошлись с результатами всех других экспериментальных исследований, вызывает очень серьезное сомнение в достоверности формулы (15). В связи с этим следует отметить, что примененный в рассматриваемой работе метод определения Nu и Nu_D по условной толщине пограничного слоя, определявшейся соответственно по распределению температур и парциальных давлений у поверхности, снятому при помощи психрометрических термомпар, нельзя признать достаточно надежным. Он вносит элемент субъективности в обработку опытных данных и может приводить к значительным погрешностям, особенно при свободном движении среды. По указанным выше причинам и выводы, сделанные в работе А. В. Нестеренко, в том числе вывод об отсутствии аналогии между тепло- и массообменом при условиях его опытов, нельзя признать достаточно подтвержденными, а его опытные данные

⁶ Для неизотермического процесса массообмена следовало, строго говоря, сопоставлять с полем температур не поле концентраций, а поле парциальных давлений пара.

нуждаются в тщательной проверке и дальнейшем объяснении.

Последнее относится и к работе М. К. Андреевой [Л. 10], исследовавшей тепло- и массообмен при свободном движении в процессе увлажнения материала (размеры образцов из асбеста 9×10 см при толщине 0,95 см, температура воздуха $19 - 43^\circ\text{C}$, $Ar \cdot Pr_D = 0,5 \cdot 10^4 - 0,8 \cdot 10^5$). Также ошибочно вводя критерий Gr вместо Ar в зависимость для теплоотдачи, Андреева предложила следующие формулы:

$$Nu = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot (Gr \cdot Pr)^{1,0} (\gamma/\gamma_0)^{1,12}; \quad (16)$$

$$Nu_D = 0,45 \cdot 10^{-4} (Ar \cdot Pr_D)^{1,15} (\gamma/\gamma_0)^{1,44}, \quad (17)$$

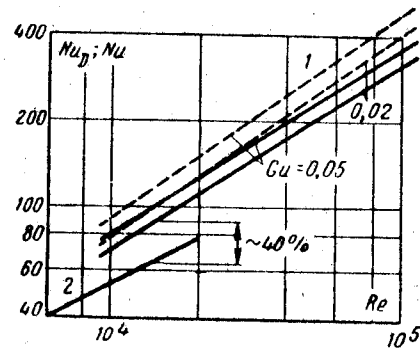
где γ и γ_0 — абсолютная влажность у поверхности материала и насыщенного воздуха при температуре его у поверхности. Величина $\varphi_n = \frac{\gamma}{\gamma_0}$

составляла в опытах от 0,45 до 0,6.

М. К. Андреева получила сравнительно близко совпадающие между собой зависимости для Nu и Nu_D , причем в обеих формулах показатель степени при $Gr \cdot Pr$ и $Ar \cdot Pr_D$ оказался примерно в 4 раза большим обычного. Интересно, что, получив в этой части результаты, противоположные полученным Нестеренко, она приводит буквально те же доводы, что и последний, для объяснения расхождений результатов своих опытов и опытов других исследователей, а именно объясняет их влиянием массообмена на теплообмен и тем, что уравнения должны были бы еще включать в себя критерий Gu , влияние которого учитывается, однако, по мнению Андреевой, критериями Gr и Ar .

Результаты опытов М. К. Андреевой имеют, однако, и сходство с результатами опытов А. В. Нестеренко. Они также дали для исследованной области $Gr \cdot Pr$ (точнее $Ar \cdot Pr$) значения теплового критерия Nu , заметно меньшие, чем опыты по чистому теплообмену (фиг. 2), что противоречит утверждению автора работы о том, что «коэффициент теплообмена при наличии массообмена ... больше коэффициента теплообмена при отсутствии массообмена» [Л. 10]. Причиной, обусловившей получение в этих опытах необычно высоких значений показателя степени при $Gr \cdot Pr$ и $Ar \cdot Pr_D$ и в то же время низких абсолютных значений Nu и Nu_D , могло явиться помимо прочего то обстоятельство, что рассматриваемые опыты велись при нестационарных режимах. Повидимому, дополнительным аргументом в уравнениях, описывающих результаты этих опытов, должен являться не критерий Gu (поскольку они проводились при неадиабатическом режиме?) или другой критерий, учитывающий слабое в этом случае влияние потока вещества, а критерий Fo , учитывающий

† Такой режим возможен только при испарении.



Фиг. 3. Зависимости $Nu = f(Re)$ и $Nu_D = f(Re)$ для испарения воды из круглого сосуда в прямоугольном канале при вынужденном движении воздуха. 1 — по формулам (18) и (19); 2 — по опытам О'Брайена и Штутцмана (определяющий размер — диаметр испарительного сосуда).

влияние нестационарности процесса. В пользу такого предположения говорят опытные данные Б. Д. Кацнельсона и Ф. А. Тимофеевой.

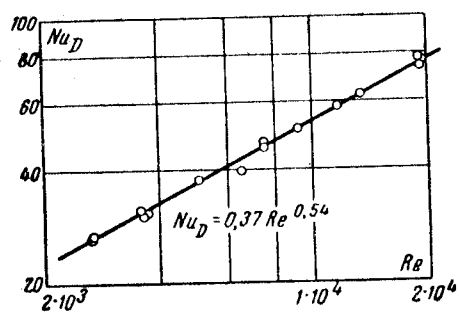
Вопросу о существовании аналогии между тепло- и массообменом при вынужденном движении среды посвящено очень большое число экспериментальных работ (Я. М. Рубинштейна, Д. Н. Вырубова, И. И. Палева и А. А. Шумилина, И. М. Федорова, М. Якоба и многих других советских и иностранных исследователей), проведенных при самых разнообразных условиях. На этих работах, подтверждающих существование при указанных выше условиях приближенной аналогии между тепло- и массообменом, мы за недостатком места останавливаться не будем, коснемся лишь рассматривавшейся уже выше работы А. В. Нестеренко, которая и в этой части содержит спорные положения, отражающие тенденцию ее автора показать отсутствие аналогии при испарении воды в воздух.

Опыты Нестеренко по испарению воды при вынужденном движении воздуха велись в отличие от опытов со свободным движением при адиабатическом режиме. На основании этих опытов (испарение воды из круглого сосуда, заделанного в нижнюю стенку прямоугольного канала, через который продувался воздух), а также опытов других авторов он предложил для области Re от 6 000 до 70 000 формулы

$$Nu = 0,202 Re^{0,73} Pr^{0,33} Gu^{0,175}; \quad (18)$$

$$Nu_D = 0,347 Re^{0,65} Pr^{0,33} Gu^{0,135}. \quad (19)$$

Как видим, исходя из отрицания аналогии, автор принял при обработке опытных данных разные зависимости для Nu и Nu_D (см. также фиг. 3). Однако даже приведенные им для одного режима данные о распределении относительных значений температур и концентраций у поверхности жидкости при вынужденном движении воздуха не обнаруживают расхождений между ними, выходящих за пределы погрешности измерений. Если учесть это, а также и то, что использование в уравнении (19) критерия Gu в каче-



Фиг. 4. Зависимость $Nu_D = f(Re)$ для испарения воды (опыты О'Брайена и Штутцмана; определяющий размер — гидравлический диаметр канала).

стве единственного дополнительного аргумента, учитывающего влияние конвективного потока вещества, даже при адиабатическом режиме допустимо лишь при подобии полей температур и парциальных давлений, едва ли можно признать обоснованным разный вид функций (особенно разные показатели степени при Re), принятый в формулах (18) и (19). Расхождение же описываемых этими формулами осредняющих кривых отражает скорее разную степень точности опытных данных, полученных для теплообмена и массообмена.

Существенным является то обстоятельство, что влияние критерия Gu также оказалось лежащим в пределах неточности опытных данных А. В. Нестеренко. Поэтому необходимость введения названного критерия для условий его опытов и предложенную количественную зависимость Nu и Nu_D от Gu нельзя еще считать достаточно подтвержденной ими. Нельзя считать подтверждением этого и результаты других опытов, использованных Нестеренко в его работе. Он не указывает в своей статье [Л. 9] источников использованных опытных данных, но нетрудно убедиться в том, что литературные данные по испарению с горизонтальной поверхности воды, бензина, толуола, пропилового спирта и ацетона взяты из упоминавшейся уже работы О'Брайена и Штутцмана. Однако опыты этих авторов велись не при адиабатическом режиме, а в преобладающей их части при режиме, близком к изотермическому. При их проведении, исключая только опыты с ацетоном, температура жидкости по возможности приближалась при помощи электрического нагревателя к температуре воздуха (разность температур жидкости и воздуха в большей части опытов поддерживалась в пределах от 0 до примерно 8°С). Поэтому они не позволяют судить о влиянии критерия Gu , не говоря уже о том, что для условий этих опытов (неадиабатический режим, жидкости с сильно различающимися свойствами) введение одного лишь дополнительного температурного критерия недостаточно для получения обобщенной зависимости, учитывающей влияние потока пара на интенсивность тепло- и массообмена.

К этому можно еще добавить, что количе-

ственное расхождение результатов опытов указанных авторов с результатами подсчетов по формуле (19) является достаточно значительным, хотя экспериментальная установка А. В. Нестеренко была выполнена по той же схеме, что установка, на которой они проводили свои опыты. Результаты, полученные ими при испарении воды, представлены на фиг. 4, причем здесь в качестве определяющего размера в критериях Nu_D и Re принят гидравлический диаметр канала. Те же данные, но пересчитанные нами с введением в качестве определяющего размера длины сосуда, как это было сделано при обработке его опытов А. В. Нестеренко, приведены на фиг. 3 (кривая 2). Как видим, в той области значений Re , в которой сравниваемые данные основываются на имеющихся опытах, расхождения по Nu_D составляют в среднем около 40%.

Мало убедительными представляются и попытки А. В. Нестеренко получить общие кривые, выражающие зависимости $Nu/Pr^{0,33} Gu^{0,175}$ и $Nu_D/Pr^{0,33} Gu^{0,135}$ от Re при вынужденном движении для плоской поверхности, расположенной внутри канала, поверхности цилиндра, сферы и капле, и предложить на основании этого формулы для тепло- и массоотдачи, охватывающие пределы Re от 1 до 70 000 и оказывающиеся якобы для всех перечисленных форм поверхности одинаковыми (в данных пределах Re) независимо от режима, при котором велись исходные опыты, благодаря введению критерия Gu . На наш взгляд такое использование этого критерия не соответствует той роли, которую он должен выполнять по мнению предложившего его А. А. Гухмана, и не может быть признано правильным.

В заключение следует отметить, что переоценка влияния массообмена на теплообмен при испарении воды и утверждения с полным отсутствием в этом случае аналогии между тепло- и массообменом, содержащиеся в названных выше и некоторых других опубликованных в последнее время работах, создали уже неправильные представления у ряда читателей этих работ. Так, например, под их влиянием иногда без достаточных к тому оснований ставятся под сомнение основывающиеся на аналогии методы расчета некоторых аппаратов, в том числе даже кондиционеров, работающих с температурами подсушиваемого или увлажняемого воздуха до 30–35°С и при достаточно малых влагосодержаниях.

ВЫВОДЫ

1. Вследствие влияния потока вещества на поля скоростей, температур и парциальных давлений аналогия между тепло- и массообменом не является полной, но как при раздельном, так и при совместном протекании этих процессов существуют условия, при которых можно пренебречь влиянием факторов, нарушающих аналогию.

В этих случаях, часто встречающихся на практике, использование выводов, вытекающих из существования приближенной аналогии между тепло- и массообменом и существенно облегчающих решение многих практических задач, вполне допустимо. Это относится, в частности, к испарительному охлаждению жидкости, многим случаям сушки, охлаждения влажных газов, горения жидкого и твердого топлива и др.

2. Для совместно протекающих процессов тепло- и массообмена область, в которой сохраняется приближенная аналогия между ними, должна быть шире, чем для отдельно протекающих процессов, и может распространяться на условия, когда поток вещества уже относительно велик. В последнем случае критериальные зависимости как для массообмена, так и для теплообмена должны включать в себя дополнительные критерии, учитывающие влияние потока вещества.

3. Имеющиеся опытные данные в большинстве хорошо подтверждают существование при определенных условиях приближенной аналогии между тепло- и массообменом. Некоторые опубликованные в последнее время эксперименталь-

ные работы, приведшие их авторов к переоценке влияния факторов, нарушающих подобие полей температур и парциальных давлений при испарении воды и сорбции водяного пара из влажного воздуха, дали противоречивые результаты, которые не могут быть признаны достаточно надежными.

4. Изучение количественного влияния потока вещества на интенсивность тепло- и массообмена для тех случаев, когда оно действительно велико, остается задачей дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. М. Рубинштейн. „Известия ВТИ“ № 12, 1935.
2. Л. Д. Берман. „Теплоэнергетика“ № 5, 1954.
3. Д. С. Спалдинг. Proc. Inst. Mech. Eng. (London) № 19, 1954.
4. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1949.
5. Ч. Уилки и др. Chem. Eng. Progr. № 12, 1953.
6. А. А. Гухман. „Теплоэнергетика“ № 5, 1954.
7. Л. О. Брайен и Л. Штутцман. Ind. Eng. Chem. № 6, 1950.
8. Л. Бэлтер и др. Ind. Eng. Chem. № 6, 1946.
9. А. В. Нестеренко. ЖТФ № 4, 1954.
10. М. К. Андреева. ЖТФ № 11, 1954.

ТЕПЛОТДАЧА ПУЧКОВ ТРУБ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Канд. техн. наук В. П. ИСАЧЕНКО
Московский энергетический институт

Большинство известных из литературы исследований теплоотдачи поперечно омываемых пучков труб было проведено с воздухом. С капельными жидкостями выполнены лишь две работы — Бергелина и др. [Л. 1] и С. А. Романовского [Л. 2]. Однако зависимость теплоотдачи от рода жидкости, ее температуры, температурного напора и направления теплового потока оставалась до сих пор не выяснена. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В настоящем исследовании изучалась теплоотдача труб коридорного и шахматного пучков в поперечном потоке воздуха, воды и трансформаторного масла. Пучки с относительными шагами $s_1/d = s_2/d = 2$ устанавливались в замкнутом канале (фиг. 1). Циркуляция рабочей жидкости осуществлялась при помощи насоса или вентилятора. Перед рабочей камерой, в которой размещены изучаемые пучки труб, были установлены солено и трубчатый успокоитель; последний одновременно служил вспомогательным теплообмен-

Описаны методика и результаты исследования теплоотдачи шахматного и коридорного пучков с $s_1/d = s_2/d = 2$ в поперечном потоке воздуха, воды и трансформаторного масла. Получены обобщенные зависимости, учитывающие влияние на теплоотдачу рода жидкости, ее температуры, температурного напора и направления теплового потока. Проведено сравнение с результатами опытов других авторов.

ником. Измерения показали, что распределение скорости и температуры перед изучаемым пучком было практически равномерным.

Из рабочей камеры жидкость отводилась в промежуточный бак, откуда снова поступала в насос. В баке был установлен элект-

рический нагреватель.

Исследованные семирядные шахматный и коридорный пучки составлялись из медных трубок с внешним диаметром 10 мм. Средние трубки ряда можно было извлекать из пучка и переставлять из ряда в ряд, не разбирая рабочую камеру. Прочие трубки были заделаны в трубные доски наглухо. Рабочие камеры были изготовлены из текстолитовых досок толщиной 20 мм; длина камеры — 400 мм, сечение для прохода жидкости — 80 × 80 мм. Таких камер было изготовлено две — по числу пучков. Пучок устанавливался на расстоянии 160 мм от солен. Перед и за пучком имелись специальные сальниковые устройства, при помощи которых в канал можно было ввести пневмометрическую трубку или подвижную термопару.

Для определения количества переданного или