滴状凝縮伝熱機構に関する研究*
(第1報, 低圧水蒸気の凝縮熱伝達率の測定)

幡 宮 重 雄**, 田 中 宏 明***

A Study on the Mechanism of Dropwise Condensation
(1st Report, Measurement of Heat-Transfer Coefficient
of Steam at Low Pressures)

by Shigeo HATAMIYA and Hiroaki TANAKA

The heat transfer coefficient was measured very carefully and repeatedly for dropwise condensation of steam in a pressure range from atmospheric pressure down to 1 kPa using five condenser surfaces. The experimental heat-transfer coefficient at 1 kPa was between 30 and 35 kW/m²K, being about six times smaller than that at atmospheric pressure. A gold-plated copper block, an ultra-finished gold disk, a silicon disk vapor-deposited with gold, and two chromium-plated copper blocks were employed as the condenser surface. The magnitude of the surface roughness of the gold and the silicon disks was smaller than the radius of the smallest droplet that can exist thermodynamically on the condenser surface under the experimental conditions. Contrary to expectation, the nucleation-site density was not directly related to the surface roughness, but seemed to be affected by subtle physico-chemical conditions of the surface.

Key Words: Phase change, Dropwise condensation, Heat-transfer coefficient, Low pressure, Nucleation site, Ultra-finished surface

1. は じ め に

滴状凝縮熱伝達においては、蒸気は液滴表面で凝縮しその際に放出された潜熱は液滴内を熱伝導により伝えられて伝熱面に達する。そのため熱伝導抵抗の小さな微小液滴が伝熱に大きな寄与をし、そのような液滴では気液界面の熱的非平衡を伴う界面伝熱現象が重要な役割を果たしている。著者の一人は、これまでの理論的研究において凝縮面上で微小液滴が発生しう点の密度と凝縮係数、この2個の未知数があたえられるなら滴状凝縮熱伝達率を予測することが可能な理論⁽¹⁾⁻⁽³⁾を完成している。このうち液滴の発生点密度は通常かなり大きな値をとり⁽⁴⁾⁽⁵⁾、液滴は密に発生することが多いが、この値は凝縮面表面の物理化学的な状態により大きく変動する可能性がある。一方、凝縮係数は蒸気相から液相にとび込んだ分子のうち反射されずにいったん液相に捕えられるものの割合を示し、物質に固有な物性値と考えられるが、水の場合には水自身の物性に起因する実験の困難さのために信頼できる

値が得られているとはいえない状況にある。

この研究では立場をかえて滴状凝縮を通して水の凝縮係数を決定することを考えてみる。その場合、気体分子運動論から定まる気液界面伝熱抵抗は、大気圧においては極めて小さく、1 μm 以下の微細液滴においてはじめて液滴内熱伝導抵抗と同等もしくはそれのしるぐ値となるにすぎず、気液界面伝熱現象を実験精度良く捕えるためには、可能なかぎり低圧として気液界面伝熱抵抗が大きい値となる条件で実験を行うのが望ま

図1 低圧水蒸気の滴状凝縮熱伝達率

* 昭和59年6月1日 第21回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和60年6月25日.

** 正員, (株)日立製作所エネルギー研究所 (〒316 日立市森山町1168).

*** 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1).

しい。ところが、これまで滴状凝縮の実験は大気圧の条件下で行われたものが大部分であり低圧域におけるデータは少ない。図1にはこれまでに報告された低圧水蒸気の滴状凝縮熱伝達率測定結果の主要なものを示してある^{(5)~(9)}。測定範囲が比較的広いものとして Graham のデータおよび Wilmshurst-Rose のデータがあるが、上述の観点から見て理論との比較に効果的な 1 kPa といった圧力域の測定結果はほとんどない。以上のことから、この報告は大気圧から 100 分の 1 atm までの低圧域において水蒸気の滴状凝縮熱伝達の信頼性の高い基礎データを得ることを目的として計画されたものである。その際に、熱伝達率と深いかかわりをもつと考えられている液滴の発生点密度に関し、液滴発生核としての可能性の高い凝縮面上のきず、溝といった微小な凹凸を液滴が熱力学的に存在できる限界の径の大きさ以下にまで仕上げた超平滑面を使用して実験を行い、微小液滴の発生点密度についても観察した。

2. 実験装置および方法

2-1 実験装置 実験装置の概要を図2に示す。装置本体は、内径 155 mm、高さ 700 mm の円筒形をしたボイラと蒸気室に、テスト凝縮器、主凝縮器が続き全体として内容積 15 L の閉ループを構成している。大気圧以下の低圧域における水蒸気の滴状凝縮実験を行うため、装置は SUS 304 製の高気密構造となっている。この装置本体は締切バルブを介して高真空排気装置と接続されており、中空状態では 0.3 mPa 以下の真空度に保つことが可能である。

実験流体としては、イオン交換樹脂を通して処理した純水(電気伝導度 $2 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上)を十分に脱気して使用した。ボイラから発生した蒸気は、蒸気室を経てテスト凝縮器に導かれる。テスト凝縮器では、蒸気の一部が凝縮し、残りの蒸気は主凝縮器に入り、そこで完全に復水しボイラにもどる。テスト凝縮器の冷却には、水またはアルコール水溶液を使用し、この液温および流量を調整することによりテスト凝縮面での熱流束および過冷度を設定することができる。主凝縮器の冷却には水を使用した。

減圧状態で液体を加熱する場合、加熱面での安定した核沸騰が抑えられ、突沸が生じやすくなる。この突沸による圧力変動を避けるためには、通常は沸騰核となる多孔質物質をあらかじめ投入しておくか、あるいは外部から微小気泡を連続的に注入し沸騰を促進する方法がとられているが、今回の低圧水蒸気の実験ではこれと逆の方針を採用した。すなわち、ボイラ内部の

シースヒータと側面のリボンヒータを併用してヒータ表面の熱流束を低く設定し、マグネットミキサでボイラ内部の液を強制的にかくはんすることにより沸騰を完全に抑え、液体表面からの蒸発に必要な蒸気量を供給するようにした。その結果、数 kPa 以下の低圧域では液面は極めて静かに蒸発を続けており、沸騰による液面からの微小液滴の飛散は認められなかった。一方大気圧近くでは、ヒータ表面で安定した核沸騰が生じており、蒸気温度は安定している。今回使用した実験装置では 10~20 kPa において、いわゆる突沸が生じやすくなるが液のにかくはん速度、補助ヒータ使用による加熱面熱流束の調整などを行い、突沸の影響をできるだけ避ける方向で実験を行った。

蒸気温度は、テストセクション内に 1 本、蒸気室内に 2 本設置された熱電対(外径 1.0 mm のアルメル・クロメル・シース熱電対)で測定し、その平均値を採用した。数 kPa 以下の低圧域では、飽和温度が室温以下となるため、蒸気室温度測定における過熱とふく射の影響を避けるべく蒸気室は二重構造としてある。外筒は補助凝縮器となっており、この凝縮器を働かせると凝縮器内部は飽和蒸気で満たされ、内部の蒸気室は飽和温度の壁面で囲まれていることになる。実際、2 kPa 以下の低圧域においては、ジブチルフタレートを封入した油マノメータを使用して蒸気室内の圧力も測定したが、この測定圧力から換算した飽和蒸気温度と、熱電対で測定した蒸気温度は概ね 0.1 K 以内の精

図2 実験装置本体

度で一致した。

図3にテスト凝縮器の構造を示す。凝縮ブロックは無酸素銅製(純度99.96%以上)で、凝縮面を端面とし直径20mm、長さ91mmの円柱状をしている(図4)。テフロン断熱材を介してテスト凝縮器内に固定され、背部から冷却液の噴流により冷却される。凝縮面は鉛直となるように設置され、蒸気はテスト凝縮器の左方から入り、右方へ出ていく。凝縮面の前方には、3mmの間隔をおいて厚さ3mmのパイレックスガラス製の観察窓があり、これを通して顕微鏡写真撮影など、液滴の観察を行う。

凝縮ブロックには図4に示した位置に内径0.6mm、深さ10mmの熱電対挿入用穴が6箇所あけてあり、これにシース外径0.5mmのアルメル・クロメル熱電対を挿入することにより、凝縮ブロック内の温度こう配、およびその外挿から凝縮面表面温度を知ることができる。また、凝縮ブロックは所定の形状に切削加工した後、加工ひずみと結晶粒の不均一をとりのぞくため、真空炉中で焼なましを行い、組織の均一化をはかった。

2.2 伝熱ブロック 滴状凝縮を生じさせるには撥水性の凝縮面が必要であり、本研究では表面仕上げの異なる以下の5種類のものを使用した。

- (A) クロムめっき凝縮面 A
- (B) 金めっき凝縮面 B
- (C) 超精密切削金凝縮面 C
- (D) シリコン上に金を蒸着した凝縮面 D
- (E) クロムめっき凝縮面 E

図4には、これらの凝縮面の表面構成が示されている。

図3 テスト凝縮器(平面図)

る。この5種類の凝縮面のうち(A), (B), (E)の表面は、銅の凝縮ブロック端面を2000番のエメリーペーパーで研磨した後、酸化アルミニウム粉末で仕上げ、その上にめっきを施したもので、いわば通常仕上げの凝縮面である。それに対し、(C)の面は銅ブロック先端に厚さ0.3mmの純金製円板を拡散接合し、その表面をダイヤモンドフライスカッタにより超精密切削加工したもので、仕上面の精度は10点平均あらさで0.02μmとなっており、これは過冷度 $\Delta T = (T_s - T_w)$ が1Kの伝熱面上における液滴の熱力学的限界半径とほぼ同程度の大きさである。(D)の面は集積回路の基板として用いられている1/1000μmオーダの超平滑面に仕上げられた厚さ0.4mmのシリコンウエハから直径19.7mmの円板を切り出して鉛-スズはんだで銅ブロック先端に接合し、シリコン表面にクロム・ニッケル・金の順に蒸着したものである。

本研究では、凝縮面としてそのまま撥水性を有するクロムと金の面を使用しており、有機物のプロモータは使用していない。金属の表面の状態は極微量の物質の吸着によっても大きく変化し、滴状凝縮においては液滴の接触角、微小液滴の発生密度に影響を与えると考えられる。そのため、凝縮面の状態をそろえ、同条件で実験を行うという観点から凝縮面は50~100h(実際に装置を運転した積算時間)程度の周期で洗浄を行った。金の凝縮面については、アルカリ液で洗浄することにより良好な滴状凝縮が生じたという

図4 伝熱ブロック(上部は全体図、他は凝縮面側端部構成図を示しかつこの数値はmm単位の各層厚さ)

Westwater らの報告⁽¹⁰⁾に従い、ここでは、10%の水酸化カリウム液で洗浄しイオン交換水ですすぐという方法を採用した。すすぎには超音波洗浄器を使用した。一方、クロム面は硬度が高くきずが付きにくい、酸に弱いという欠点がある。今回は脱脂綿に含ませたエチルアルコールで凝縮面をふきとるだけにした。ただし(E)のクロム凝縮面Eは洗浄を行う以前に興味ある状況が見いだされたため、その表面状態を変化させないように、洗浄は行わず、めっき仕上げをしたそのままの状態で行った。実験の積算時間が150hを経過した後でも凝縮面上の液滴の状態にはほとんど変化が見られなかった。

2.3 実験方法 実験を開始する前の水の脱気操作は以下の手順で行った。リザーバタンク(図2参照、容量6.5L)にイオン交換処理をした純水を約5.5L入れ、常温のまま補助真空ポンプにより真空排気する。この時点で、タンク内は水の飽和圧力まで低下し、純水中に溶解していた不凝縮気体の大部分が脱気される。次に装置本体に水を移動させ、ボイラと主凝縮器を利用して大気圧近くの圧力で蒸気の発生と凝縮を繰返し、主凝縮器に濃縮されるであろう不凝縮気体を補助真空ポンプで間欠的に抽気し、さらに脱気を行った。この脱気運転は、試料水全体が少なくとも1回は蒸発・凝縮を完了するまで行った。なお、この脱気操作中は、テスト凝縮器にはダミーのブロックを取付けておく。十分な脱気を行った後、水をリザーバタンクに移しブロックをテスト凝縮面に交換する。次に装置本体を3 mPa程度の高真空に排気した後排気系へ通じる締切バルブを閉じ、リザーバタンクから水を戻して実験を開始した。実験条件に設定後この系が定常に達するまでの時間は3~4hであった。系の安定性に大きな影響を与える主凝縮器の冷却液温は、打点式記録計で、30sごとに記録し監視した。

実験は大気圧以下の低圧域を対象とし、大気圧から100分の1 atmの圧力範囲にわたり、水蒸気の滴状凝縮熱伝達率を測定した。熱伝達率 h は、凝縮ブロック内の温度こう配から熱流束 q と凝縮面表面温度 T_w を求め、これと蒸気温度 T_s との差を過冷度 ΔT として算出される。凝縮ブロック内の温度測定用の6本の熱電対および蒸気温度測定用の3本の熱電対の熱起電力を最小分解能が0.1 μ Vの高精度デジタル電圧計(タケダ理研 TR 6856)で読取り、これを10回繰返しその平均値を測定値とした。熱伝達率の測定を行った直後に凝縮面上の液滴の顕微鏡写真撮影を行い、撮影終了後再度熱伝達率を測定して実験条件に変化がないことを確認した。蒸気圧力を変えた実験の場合、凝縮

面過冷度 ΔT は1.5 K程度の値とした。また、蒸気圧力を一定とし、凝縮面過冷度を変化させた実験も行った。

テスト凝縮器内の蒸気流は、凝縮面近傍に蓄積される不凝縮気体を吹きとばす効果があるほか、そのせん断力により離脱径を小さくするという働きもある。この実験では、蒸気流による動圧 $u^2/2\rho_g$ が実験圧力によらずほぼ一定値4 Paとなるようにテスト凝縮器内の平均蒸気流速 u を設定した。 $\Delta T=1.5$ Kの場合この設定蒸気流速 u と凝縮面での凝縮に伴う吸込速度 u_s の比 u/u_s が10前後の値となる。蒸気流速の実際値は、大気圧では3.6 m/sであるが、100分の1 atmでは蒸気密度が低くなるため32 m/sにもなる。

3. 凝縮面上の微小液滴の観察

撥水性固体面上での液滴の発生機構は、滴状凝縮の素過程という点で極めて興味ある問題である。これまでの研究で、初生液滴は凝縮面上のある定まった点から発生するという、いわゆる、核生成説が大方の支持を得ているように思われる。またその際の液滴の発生核としては、McCormick ら⁽¹¹⁾の研究によって、凝縮面上に存在する微小な凹凸の可能性が高いと考えられてきた。実際、顕微鏡を通して凝縮面上の微小液滴を観察していると、図5に見られるように、液滴は凝縮面上のきずに沿って発生しているように見える場合があり、液滴発生核に関するMcCormick らの説は極めてもっともらしく思えてくる。それでは、熱力学的に存在可能な液滴の最小寸法以下まで表面の凹凸を仕上げた超平滑凝縮面上では、もはや液滴発生核となるべきものが存在しなくなると思われるが、そのような面ではどのような滴状凝縮が見られるであろうか。図6は金切削凝縮面Cのカーボンレプリカをとり、それを

図5 凝縮面上のきずに沿って発生する微小液滴(凝縮面Aと同種のクロムめっき面)

透過形電子顕微鏡を使用して、写真撮影したものである。写真には、縦に走る連続したきずが見られるが、これはダイヤモンドカッタの切削こんであり、この写真では倍率が高すぎるため見るできないけれども、干渉顕微鏡による観察では、このようなこん跡が切削時の刃物の送りに相当する約 $15\text{ }\mu\text{m}$ の間隔で並んでいて、その間隔で表面にゆるやかなうねりがあり、その大きさが $2/100\text{ }\mu\text{m}$ 程度であった。この写真から判断するかぎりにおいて、金切削凝縮面 C は、規則的に並んでいる切削こんはあるものの、それ以外には熱力学的限界液滴径に比すべききずがほとんど存在しない超平滑面と見なすことができる。ところが、予想に反してこのような超平滑面上でも液滴は相当密に発生するという結果が得られた。図 7 は、表面仕上げの異なる 3 種類の金凝縮面上ではほぼ同じ蒸気圧力と類似の凝縮面過冷度で滴状凝縮を行わせて撮影した顕微鏡写真のうちから、それぞれ微小液滴の密度の高い部分を捕えているものを選んで示したものである。(B) は通常仕上げの凝縮面、(C)、(D) は超平滑凝縮面となっている。いずれの写真でも液滴半径が $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 程度の液滴まで認めることができるが、この範囲においては微小液滴の存在密度に大きな違いがあるようには見えない。一方、表面の平滑度はそれほど高くない(E)のクロムめっき凝縮面においては、やや偶然的ではあるがその特定の面については繰返し安定して、微小液滴の存在密度が他に比べて際立って低い特異な滴状凝縮状況が観察された。図 8 は、超精密切削金凝縮面 C 上とクロムめっき凝縮面 E 上の同一実験条件下の滴状凝縮の写真と比較したものである。明らかにクロム面 E 上の微小液滴の存在密度が低くなっている。ただし、この微小液滴密度の差は低圧域でのみ顕著に見られ、クロム面 E では蒸気圧力が高くなっていくに従い微

小液滴の存在密度が増加してゆき、 $T_s=334\text{ K}$, $\Delta T=1.3\text{ K}$ の条件では金凝縮面 C と区別がつかない程度になっていた。

4. 実験結果

4-1 金凝縮面の熱伝達率 3 種類の金凝縮面 (B), (C) および (D) について、飽和蒸気圧 P_s を変えて熱伝達率 h を測定した結果をまとめて図 9 に示した。研摩剤により銅ブロック表面を鏡面に仕上げたうえで、金めっきを施した金凝縮面 B を使用した実験は、いわゆる通常仕上げの凝縮面として熱伝達率の基礎データを得る目的のために、約 2 か月の期間にわた

図 7 3 種類の金凝縮面上に発生した微小液滴の顕微鏡写真

図 6 超精密切削金凝縮面 C の電子顕微鏡写真

図 8 凝縮面上の微小液滴存在密度の違い

り繰返し行われた。この面に関するデータの測定時の凝縮面過冷度 ΔT は $1.1 \sim 1.5$ K の範囲内にある。大気圧における熱伝達率は $250 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度であり、蒸気圧力の低下につれて熱伝達率は低下し、100 分の 1 atm では $35 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となっている。図 9 中に示した実線の $\pm 10\%$ 以内に全データの 90% 以上が含まれ、測定値の再現性は良好といえる。

ともに超平滑面と考えられる金切削凝縮面 C とシリコン上に金を蒸着した金凝縮面 D を使用した滴状凝縮実験の結果も図 9 にプロットされている。これらの面の実験では凝縮面過冷度 ΔT が $1.5 \sim 2.0$ K と金めっき凝縮面 B に比べ多少大きめになっているが、すぐ後に述べるとおり ΔT が 1.0 K を超えたあたりでは熱伝達率は ΔT によってほとんど影響を受けない。超平滑凝縮面 (C) および (D) の熱伝達率の測定結果は互いにほぼ同程度の値を示しており、金めっき凝縮面 B の結果と比較すると、やや低い、全体としての傾向はよく似ている。このことは、先の図 7 の写真において 3 種類の金凝縮面の間で微細液滴の存在密度に大きな差が認められなかったことから自然に理解できる。離脱液滴半径 $R_{\max}$ は 3 種類の金凝縮面に共通に 100 分の 1 atm で 1.5 mm であった。

図 10 は、超平滑金凝縮面を使用し、一定蒸気圧力下で凝縮面過冷度 ΔT を変化させて熱伝達率 h を測定した結果である。 ΔT が 1.0 K を超えたあたりでは、 h はほぼ一定の値を示しているが、 ΔT が小さくなっていくと h は緩やかに低下していく。 ΔT が 0.4 K の場合の h の値は、 $\Delta T = 1.0$ K のときの値と比較して、約 15% 程度低くなっていた。

4.2 クロム凝縮面の熱伝達率 鏡面仕上げした銅ブロック表面にクロムめっきを施した凝縮面 (A) および (E) について滴状凝縮熱伝達率を測定した結果を図 11 に示す。まず、クロム面 A では、大気圧における

熱伝達率は $200 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、100 分の 1 atm では $32 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となっており、4.1 節の 3 種類の金凝縮面の結果とほとんど同じ傾向を示している。液滴は半球形に近く、離脱液滴半径 $R_{\max}$ は 100 分の 1 atm において約 1.3 mm であった。

クロム凝縮面 E は、クロム凝縮面 A と同じ研磨とめっきを行って作られたものであるが、図 8 の写真に見られたように低圧域では微小液滴の存在密度が際立って低いという興味ある状況を呈した。滴状凝縮では、伝熱の大部分が微小な液滴を通しておこなわれると考えられており、この写真から予想すると、クロム凝縮面 E の熱伝達率は、他の凝縮面より低い値を示すものと思われた。しかしながら、実際に測定を行ってみると、図 11 に示されているように、熱伝達率の値はクロム凝縮面 A とほとんど違いがなかった。100 分の 1 atm における熱伝達率は $33 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、大気圧では $230 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と推定され、クロム凝縮面 A の場合より熱伝達率はむしろわずかに高い値を示している。ただし、熱伝達率に影響を与える離脱液滴半径 $R_{\max}$ は 100 分の 1 atm において 1.0 mm と、多少小さな値となっており、また大液滴に合体される小液滴が一部大液滴の陰に隠れて写っている顕微鏡写真の状況などから判断して、液滴の接触角は 90° を超えており $100 \sim 105^\circ$ と推定される。いずれにせよ、低蒸気圧域において微小液滴の存在密度が他の凝縮面より際立って低いにもかかわらず、その圧力域での熱伝達率が他の凝縮面とほとんど変わらないという事実は大変に興味深く、次報では滴径分布と熱伝達率という観点からこの理由について考察する。

5. む す び

大気圧以下、100 分の 1 atm までの圧力範囲において、5 種類の表面仕上げの異なる伝熱面を使用して、

図 9 金凝縮面の熱伝達率測定結果

図 10 凝縮面過冷度と熱伝達率

図 11 クロム凝縮面の熱伝達率測定結果

水蒸気の滴状凝縮実験を行い以下の結果を得た。

(1) 水蒸気の滴状凝縮熱伝達率は蒸気圧の低下とともに減少する。凝縮面過冷度が1.5 K前後の場合、1 kPaにおける水蒸気の滴状凝縮熱伝達率は、30~35 kW/(m²·K)である。

(2) 1 kPa程度の低圧域では、半径数 μm 以下の微小液滴の存在密度が相当違っても滴状凝縮熱伝達率の値はあまり変化しない。

(3) 液滴は凝縮面上のある定まった位置から繰返し発生し、凝縮面上にきずがある場合には、それに沿って発生するように見えるが、熱力学的に存在可能な限界の液滴寸法以下まで表面粗さを仕上げた超平滑面上においても液滴は相当密に発生する。一方、通常仕上げの面であっても、表面状態の微妙な違いで、初生

液滴が疎にしか発生しない場合がある。

おわりに、この研究をすすめるにあたりご助言をいただいた植田辰洋名誉教授に謝意を表する。高気密性の実験装置の製作にあたり東京真空機械(株) 中川洋氏に、また、超精密仕上凝縮面の製作には(株)日立製作所中央研究所の奥脇東洋治氏、加藤重雄博士にご援助をいただいた。ここに謝意を表する。実験は、もと学部学生の前田隆君、川崎慎司君、柳本潤君のご協力を得て行ったものである。またこの研究は科学研究費補助金 No. 57460093 によって行った。

文 献

- (1) Tanaka, H., *Trans. ASME, Ser. C*, 97-1 (1975), 72.
- (2) Tanaka, H., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 101-4 (1979), 603.
- (3) Tanaka, H., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-3 (1981), 606.
- (4) Graham, C. and Griffith, P., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 16-2 (1973), 337.
- (5) Tanaka, H. and Tsuruta, T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 27-3 (1984), 327.
- (6) Tanner, D. W., ほか3名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 11-2 (1968), 181.
- (7) Wilmshurst, R. and Rose, J. W., *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, 6, Cs. 1. 4, (1970).
- (8) Krischer, S. and Grigull, U., *Wärme Stoff übertrag.*, 4 (1971), 48.
- (9) Graham, C., Ph. D. Thesis, Massachusetts Inst. Tech., (1969).
- (10) Woodruff, D. W. and Westwater, J. W., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-4 (1981), 685.
- (11) McCormick, J. L. and Westwater, J. W., *Chem. Eng. Sci.*, 20-12 (1965), 1021.