

純冷媒の水平内面螺旋溝付管内凝縮：局所熱伝達係数の整理式作成の試み

兪, 堅
九州大学機能物質科学研究所

小山, 繁
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/7861>

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 10 (2), pp.145-150, 1997-03-15. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

純冷媒の水平内面螺旋溝付管内凝縮

— 局所熱伝達係数の整理式作成の試み —

俞 堅 ・ 小 山 繁

Condensation of Pure Refrigerants in Microfin Tubes - A Correlation for Local Heat Transfer Coefficient -

Jian YU and Shigeru KOYAMA

In the present study the local condensation heat transfer characteristics in horizontal microfin tubes were investigated experimentally with pure refrigerants HFC134a, HCFC123 and HCFC22. From the experiments, it was found that the heat transfer coefficients for microfin tubes are about 2 times higher than those of smooth tubes with the same inner diameter. This enhancement effect on heat transfer coefficient seems mainly caused by the enlargement of heat transfer area. From this point of view, a correlation, which is modified from the correlation of Haraguchi et al. for smooth tubes, is proposed for the condensation in microfin tubes with pure refrigerants.

1. 緒 言

現在、冷凍・空調用の熱交換器には冷媒側伝熱性能の向上のために、内面螺旋溝付管が多く用いられている。さらに、居住空間の有効利用や小型軽量化のために細径化が進みつつある。

純冷媒の内面螺旋溝付管内凝縮に関しては従来から数多くの研究がなされている。例えば、本田ら⁽¹⁾は純冷媒 CFC11 について伝熱管出口での流動状態の観察、摩擦圧力損失の整理及び溝部の液膜熱伝達の理論解析を試みている。また、原口ら^(2,3)は純冷媒 HFC134a, HCFC123 及び HCFC22 の平滑管内と溝付管内の熱伝達特性の比較、並びに摩擦圧力損失の整理式の作成を行っている。さらに、最近、鹿園ら⁽⁴⁾は溝部での液膜に作用する表面張力の影響を考慮して熱伝達特性の予測を試みている。

本報では、原口ら⁽³⁾の純冷媒の水平平滑管内凝縮熱伝達の整理式の作成方法を参考にして、純冷媒 HFC134a, HCFC123 及び HCFC22 の水平内面螺旋溝付管

受理日 1997年1月16日

内凝縮の局所熱伝達係数の整理式の作成を試みる。

記 号

A	:式(16)で定義	[-]
C_p	:定圧比熱	[J/(kg K)]
d_i	:管内径	[m]
G	:冷媒流量	[kg/(m ² s)]
g	:重力加速度	[m/s ²]
Ga	:ガリレオ数	[-]
$H(\xi)$:式(17)で定義	[-]
Nu	:ヌセルト数	[-]
Ph_l	:相変化数	[-]
Pr	:プラントル数	[-]
Q	:伝熱量	[W]
q	:実面積基準で定義した熱流束	[W/m ²]
Re	:レイノルズ数	[-]
T	:温度	[K]
T_i^+	:無次元温度差	[-]
x	:クオリティ	[-]

ギリシャ文字

α	: 熱伝達係数	[W/(m ² K)]
Δl	: 小区間長さ	[m]
η_A	: 伝熱面積拡大率	[-]
λ	: 熱伝導率	[W/(m K)]
μ	: 粘度	[Pa s]
ξ	: ボイド率	[-]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
τ_w	: 壁面剪断力	[N/m ²]
Φ_v	: 二相流摩擦損失パラメータ	[-]
χ_{tt}	: Lockhart-Martinelli パラメータ	[-]

添字	
B	: 自然対流
F	: 強制対流
L	: 液体
V	: 蒸気
cal	: 予測計算値
exp	: 実験値
sat	: 飽和状態
wi	: 管内面
fin	: 溝付管
smooth	: 平滑管

と彼らの平滑管に関する整理式⁽⁵⁾との比較を示す。ここに、溝付管の局所熱伝達係数 α 及び局所ヌセルト数 Nu は以下のように定義している。

$$\alpha = \frac{Q}{\pi d_i \Delta l (T_{sat} - T_{wi})} \quad (1)$$

$$Nu = \alpha d_i / \lambda_L \quad (2)$$

ここに、 Q は長さ Δl の小区間における伝熱量、 d_i は溝付管の平均内径、 T_{sat} は冷媒飽和温度、 T_{wi} は管内面温度である。溝付管の実験値は平滑管の整理式による計算値に比して 1.4~3.5 倍高い値であり、平均的には約 2 倍高い。なお、伝熱促進率は、凝縮の進行とともに若干低下する傾向にある。

溝付管の凝縮熱伝達特性は、平滑管と同様に、高流量・高クオリティの場合は強制対流凝縮的（剪断力が支配的）であり、低流量・低クオリティの場合は自由対流凝縮的（重力が支配的）である。溝はいずれの凝縮形態の場合も伝熱を促進する効果を有するが、溝形状パラメータが伝熱促進に及ぼす影響については定量的にはほとんど明らかにはされていない。本報では、溝形状パラメータの中で最も影響の大きいと考えられる面積拡大率を考慮するために、局所熱伝達係数を以下のように定義する。

2. 内面螺旋溝付管内凝縮熱伝達係数の整理式の作成

Fig. 1 は原口ら⁽²⁾の純冷媒 HFC134a, HCFC123 及び HCFC22 の水平内面螺旋溝付管内凝縮熱伝達の実験結果（溝付管の諸元は付録 1, 実験データは付録 2 参照）

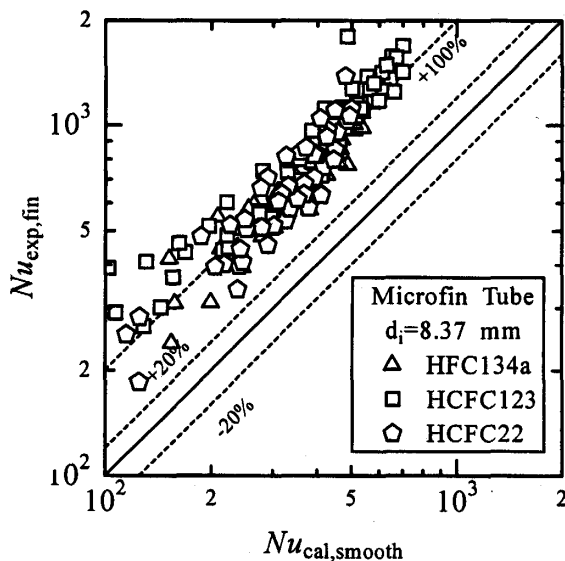


Fig. 1 Comparison between the correlation for smooth tubes and the experimental data for a microfin tube

$$\alpha = \frac{Q}{\pi d_i \eta_A \Delta l (T_{sat} - T_{wi})} \quad (3)$$

ここに、 η_A は面積拡大率である。なお、内面螺旋溝付管の溝高さは一般に 0.3 mm 以下であるので、溝により形成されるフィンの効率は 1.0 に近いと考えられる。

溝付管内凝縮熱伝達の整理式は平滑管の場合⁽⁵⁾と同様に次式で表されると仮定する。

$$Nu = \alpha d_i / \lambda_L = (Nu_F^m + Nu_B^m)^{1/m} \quad (4)$$

ここに、 Nu_F は強制対流凝縮を表す項、 Nu_B は自由対流凝縮を表す項、 m はこれらの項を結合する指数である。

強制対流凝縮項 Nu_F は、環状乱流液膜理論に基づき次式で表されるとする。

$$Nu_F = Re_L^* Pr_L / T_i^+ \quad (5)$$

ここに、 Re_L^* は膜レイノルズ数、 T_i^+ は気液界面と管壁の間の無次元温度差であり、以下のように定義される。

$$Re_L^* = \frac{\rho_L \sqrt{\tau_w / \rho_L} d_i}{\mu_L} \quad (6)$$

$$T_i^+ = \frac{\rho_L C_{pL} \sqrt{\tau_w / \rho_L} (T_{sat} - T_{wi})}{Q / (\eta_A \pi d_i \Delta l)} \quad (7)$$

溝付管の壁面剪断力 τ_w の予測には、以下の原口ら⁽³⁾の整理式を用いる。

$$\tau_w = \tau_{wV} \Phi_V^2 \quad (8)$$

ここに、 τ_{wV} は二相流中の気相成分のみが平滑管内を充滿して流れたと仮定した時の壁面剪断力であり、次式で表される。

$$\tau_{wV} = \frac{0.023 G^2 x^2 / \rho_V}{(G x d_i / \mu_V)^{0.2}} \quad (9)$$

また、 Φ_V は二相流摩擦損失パラメータであり、次の原口ら⁽³⁾の実験式を用いる。

$$\Phi_V = 1.1 + 1.3 \left[\frac{G \cdot \chi_H}{\sqrt{g d_i \rho_V (\rho_L - \rho_V)}} \right]^{0.35} \quad (10)$$

ここに、

$$\chi_H = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_V} \right)^{0.1} \quad (11)$$

式(5)に式(6)、(8)及び(9)を代入し、整理すると次式が得られる。

$$Nu_F = 0.152 (\Phi_V / \chi_H) Re_L^{0.9} (Pr_L / T_i^+) \quad (12)$$

ここに、 Re_L は液レイノルズ数であり次式で定義される。

$$Re_L = G(1-x) d_i / \mu_L \quad (13)$$

次に、自由対流凝縮項 Nu_B は、次式で表されると仮定する。

$$Nu_B = \frac{0.725}{\eta_A^{1/4}} \cdot H(\xi) \left(\frac{Ga Pr_L}{Ph_L} \right)^{1/4} \quad (14)$$

ここに、 $H(\xi)$ は凝縮面として有効に作用する領域を表す関数であり、ボイド率 ξ の関数として次式で近似する。

$$H(\xi) = \xi + A \sqrt{\xi(1-\sqrt{\xi})} \quad (15)$$

ここに、 A はボイド率の関数である。また、ボイド率 ξ は次の Smith⁽⁶⁾ の式で表されるとする。

$$\xi = \left[1 + \frac{\rho_V}{\rho_L} \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(0.4 + 0.6 \sqrt{\frac{\frac{\rho_L + 0.4 \frac{1-x}{x}}{\rho_V}}{1 + 0.4 \frac{1-x}{x}}} \right) \right]^{-1} \quad (16)$$

Nu_F 及び Nu_B は平滑管の場合⁽⁵⁾と同様に以下のようにして求めた。

(1) 指数 m をパラメータとし、 Nu_B を仮定し、次式より Pr_L / T_i^+ を求める。

$$\frac{Pr_L}{T_i^+} = \frac{(Nu^m - Nu_B^m)^{1/m}}{0.152 (\Phi_V / \chi_H) Re_L^{0.9}} \quad (17)$$

(2) Pr_L / T_i^+ が Pr_L と Re_L の関数で表わされると仮定して、手順(1)の結果よりその近似式を作成する。

(3) 手順(2)で仮に求めた Nu_F を用いて次式より A を計算する。

$$A = \frac{H(\xi) - \xi}{\sqrt{\xi(1-\sqrt{\xi})}} \quad (18)$$

ここに、

$$H(\xi) = \frac{\eta_A^{1/4} (Nu^m - Nu_F^m)^{1/m}}{0.725 (Ga Pr_L / Ph_L)^{1/4}} \quad (19)$$

(4) A がボイド率 ξ の関数で表わされると仮定して、手順(3)の結果よりその近似式を作成する。

(5) 手順(4)で仮に求めた Nu_B を用いて再び手順(1)の計算を行う。

手順(1)から(5)を試行錯誤的に繰り返し、 Nu_F 及び Nu_B の整理式を求めた。Fig. 2 及び 3 にその結果を示す。Fig. 2 中の高流量で高クオリティのデータは実線で近似できる。Fig. 3 中の低クオリティのデータは実線で近似できる。得られた溝付管に対する整理式は以下のようにまとめられる。

$$Nu = (Nu_F^2 + Nu_B^2)^{1/2} \quad (20)$$

ここに、強制対流凝縮域のヌセルト数 Nu_F は、

$$Nu_F = 0.152 [0.3 + 0.1 Pr_L^{1.1}] (\Phi_V / \chi_H) Re_L^{0.68} \quad (21)$$

$$\Phi_V = 1.1 + 1.3 \left[\frac{G_R \cdot \chi_H}{\sqrt{g d_i \rho_V (\rho_L - \rho_V)}} \right]^{0.35} \quad (22)$$

自由対流凝縮域のヌセルト数 Nu_B は、

$$Nu_B = \frac{0.725}{\eta_A^{1/4}} \cdot H(\xi) \left(\frac{Ga Pr_L}{Ph_L} \right)^{1/4} \quad (23)$$

$$H(\xi) = \xi + A \sqrt{\xi(1-\sqrt{\xi})} \quad (24)$$

$$A = 10(1-\xi)^{0.1} - 8.0 \quad (25)$$

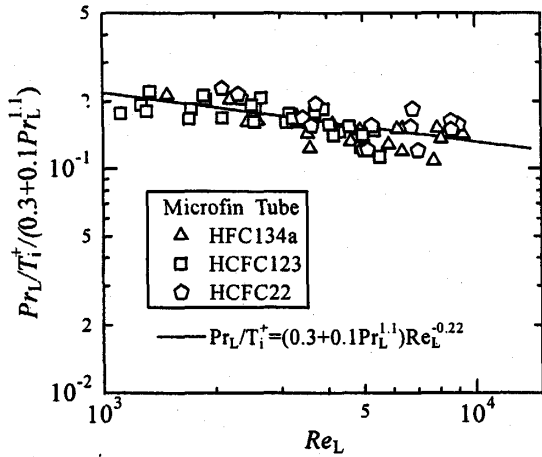


Fig.2 Forced convective condensation component

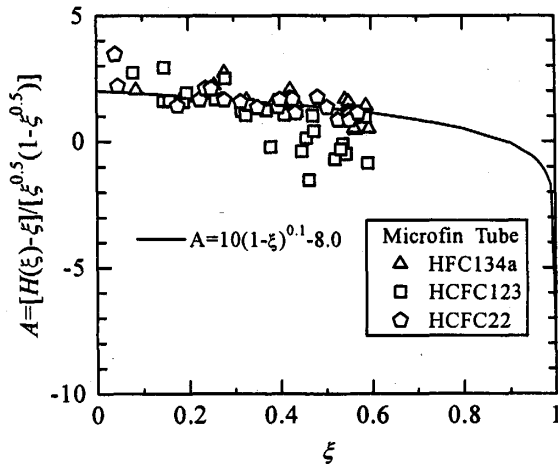


Fig.3 Natural convective condensation component

3. 整理式と実験データとの比較

Fig. 4 に式 (20) と原口らの実験結果⁽²⁾ (溝付管の諸元は付録 1 参照) との比較を示す。Fig. 4(a), (b) 及び (c) はそれぞれ HFC134a, HCFC123 及び HCFC22 の結果であり、縦軸は実験値、横軸は式 (20) による予測計算値である。いずれの冷媒の場合も、予測値は実験値と比較的よく一致している。

Fig. 5 は HCFC123 の局所ヌセルト数の実験値と整理式による計算値を $1-x$ に対してプロットしたものである。 $G=300\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ の場合は、整理式は実験値とよく一致する。 $G=100\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ の場合は、整理式は高クオリティ領域で実験値より若干低い値となる。

Fig. 6 に式 (20) と小山らの実験結果⁽⁷⁾ (溝付管の諸元は付録 1 参照) との比較を示す。予測計算値と実験値とはよく一致している。

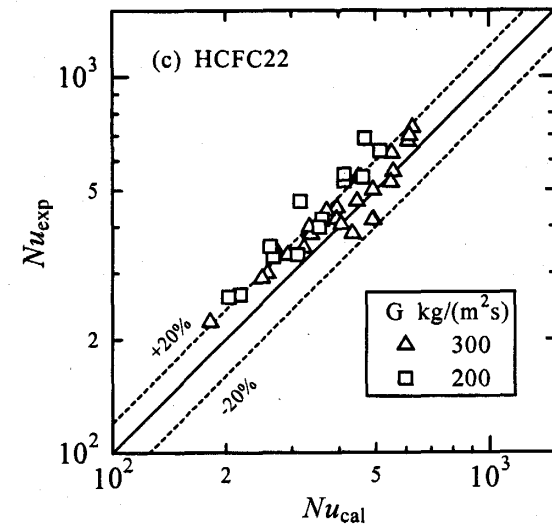
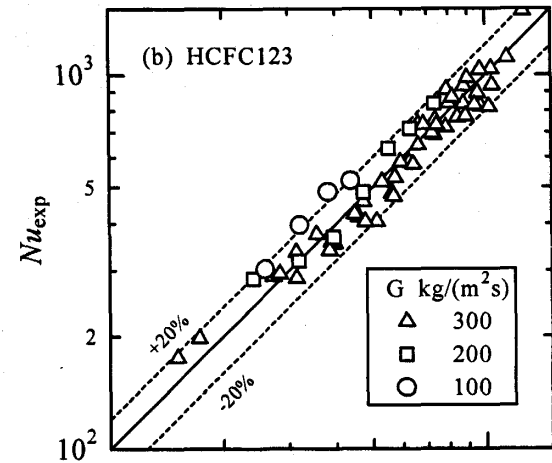
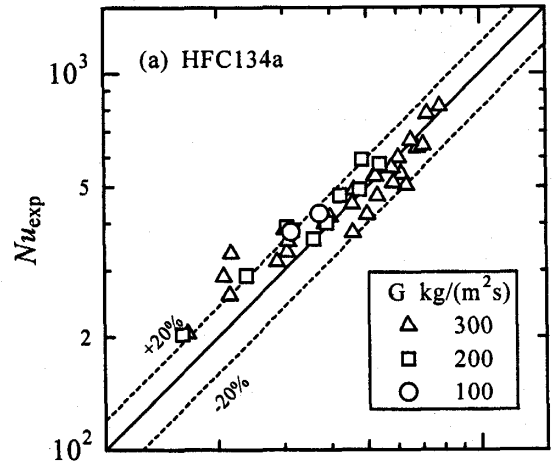
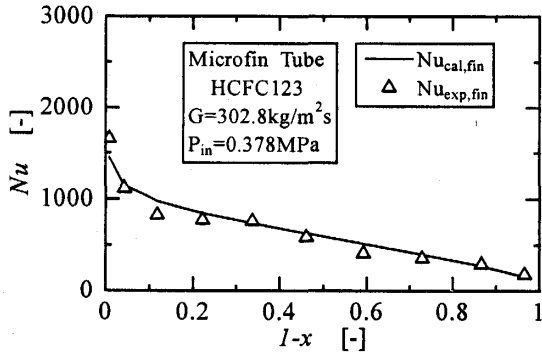
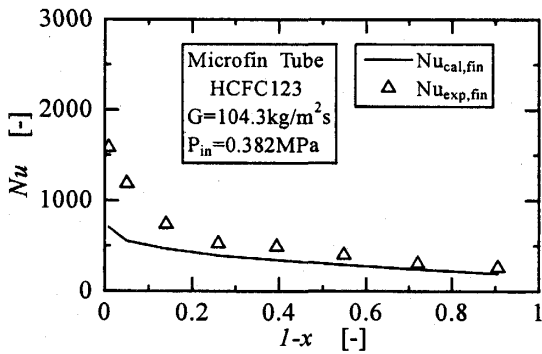


Fig.4 Comparison between experimental data of Haraguchi et al. and equation (20)



(a) $G \approx 300 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ s})$



(b) $G \approx 100 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ s})$

Fig.5 Relation between Nu and 1-x

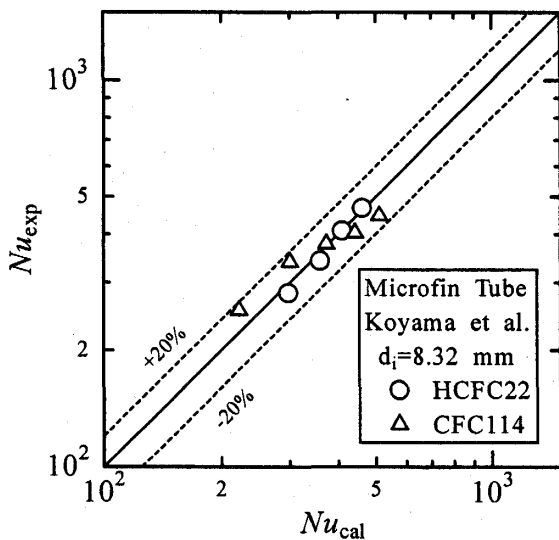


Fig. 6 Comparison between experimental data of Koyama et al. and equation (20)

4. 結 論

純冷媒が水平内面螺旋溝付管内で凝縮する場合について、溝形状パラメータの中で最も影響が大きいと考えられる面積拡大率を考慮するために、局所熱伝達係数を実面積基準で定義した。そして、その局所熱伝達係数が、平滑管の場合と同様に強制対流凝縮支配域の熱伝達係数と自由対流凝縮支配域の熱伝達係数の和で表されると仮定して、原口ら⁽²⁾の実験データに対する整理式を得た。この整理式で、原口らのデータの大半及び小山ら⁽⁷⁾のデータは±20%以内の差異で相関できた。

参 考 文 献

- (1) 本田博司, 野津滋, 片山博正, 中田春男, 第 22 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1985), p. 335.
- (2) 原口英剛, 小山繁, 江崎潤一, 藤井哲, 第 30 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1993), p. 343.
- (3) 原口英剛, 小川秀彦, 小山繁, 藤井哲, 第 31 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1994), p. 742.
- (4) 鹿園直毅, 伊藤正昭, 内田麻理, 福島敏彦, 第 30 回空気調和・冷凍連合講演会, (1996), p. 141.
- (5) 原口英剛, 小山繁, 藤井哲, 機論(B), 60-574 (1994), p. 245.
- (6) S. L. Smith, Heat Fluid Flow, 1-1(1970), p. 22.
- (7) 小山繁, 宮良明男, 高松洋, 米本和生, 藤井哲, 九州大学機能物質科学研究所報告, 1-1(1987), p. 57.

付録 1 溝付管の諸元

Dimensions of microfin tubes

Dimension	Haraguchi et al. ⁽²⁾	Koyama et al. ⁽⁷⁾
O.D.	10.00 mm	9.52 mm
I.D.*	8.37 mm	8.32 mm
fin height	0.17 mm	0.15 mm
fin pitch	0.44 mm	0.44 mm
fin number	60	60
helix angle	18 deg	30 deg
ratio of area increase	1.52	1.23

* Inside diameter for microfin tube is an averaged value, with which the cross sectional area of a smooth tube is equal to that of the microfin tube.

付録2 実験データ

Experimental data for HCFC123

G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —	G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —
302.8	0.991	0.372	69.41	68.15	16.20	1653.9	201.7	0.987	0.381	70.37	69.65	10.58	1896.7
302.8	0.956	0.369	69.22	67.45	15.35	1112.5	201.7	0.950	0.380	70.29	69.13	9.82	1096.1
302.8	0.882	0.367	68.93	66.82	13.55	823.0	201.7	0.876	0.379	70.17	68.79	8.93	837.5
302.8	0.778	0.363	68.53	65.99	15.38	769.1	201.7	0.772	0.378	70.01	68.20	10.09	718.4
302.8	0.663	0.360	68.16	65.38	16.62	756.6	201.7	0.660	0.376	69.85	67.71	10.56	634.2
302.8	0.539	0.356	67.81	63.98	17.77	583.5	201.7	0.541	0.375	69.69	66.77	11.10	485.2
302.8	0.408	0.353	67.45	61.67	18.56	405.8	201.7	0.415	0.373	69.53	65.38	12.06	368.6
302.8	0.270	0.351	67.23	60.44	19.42	353.9	201.7	0.281	0.372	69.44	64.54	12.33	318.4
302.8	0.134	0.350	67.14	59.36	18.32	289.5	201.7	0.147	0.372	69.40	64.01	12.20	285.3
302.8	0.034	0.349	67.06	56.51	15.20	175.4	201.7	0.040	0.371	69.37	62.61	10.34	191.5

Experimental data for HFC134a

G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —	G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —
302.2	0.984	1.249	47.90	46.70	13.26	1250.7	201.5	0.987	1.251	47.95	47.27	8.29	1346.7
302.2	0.926	1.248	47.86	45.87	11.53	671.1	201.5	0.932	1.250	47.93	46.64	7.26	696.1
302.2	0.840	1.247	47.81	45.53	12.60	636.1	201.5	0.845	1.250	47.91	46.20	8.56	576.8
302.2	0.746	1.245	47.77	45.09	13.93	598.8	201.5	0.749	1.249	47.89	46.07	9.40	592.8
302.2	0.642	1.244	47.72	44.02	15.34	474.2	201.5	0.641	1.248	47.87	45.29	10.68	475.6
302.2	0.526	1.242	47.68	42.56	17.06	378.3	201.5	0.517	1.248	47.85	43.97	12.41	364.7
302.2	0.397	1.241	47.65	42.22	19.21	400.5	201.5	0.373	1.247	47.84	43.62	14.57	392.2
302.2	0.260	1.241	47.63	41.23	19.09	336.0	201.5	0.216	1.247	47.83	42.38	14.70	304.2
302.2	0.123	1.240	47.62	39.22	19.45	258.6	201.5	0.069	1.247	47.83	40.10	14.53	210.1
302.2	0.027	1.240	47.61	36.17	16.25	157.1							

Experimental data for HCFC22

G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —	G kg/(m ² s)	x —	P MPa	T_{sat} °C	T_w °C	q kW/m ²	Nu —
302.8	0.985	1.854	47.97	47.06	10.84	1321.1	202.1	0.976	1.844	47.73	47.40	5.05	1837.5
302.8	0.937	1.853	47.95	46.51	9.63	755.9	202.1	0.921	1.843	47.71	46.94	5.72	819.1
302.8	0.866	1.852	47.93	46.17	10.49	675.7	202.1	0.857	1.843	47.70	46.70	6.57	725.0
302.8	0.787	1.851	47.90	45.80	11.72	627.4	202.1	0.783	1.842	47.69	46.18	7.38	538.8
302.8	0.699	1.850	47.87	44.91	13.26	434.0	202.1	0.701	1.842	47.67	45.44	8.26	404.6
302.8	0.600	1.849	47.85	43.55	14.89	382.8	202.1	0.606	1.841	47.66	45.28	9.60	440.6
302.8	0.486	1.848	47.83	43.31	17.43	424.9	202.1	0.502	1.841	47.65	44.89	10.13	398.7
302.8	0.363	1.848	47.81	42.35	17.55	351.6	202.1	0.390	1.840	47.65	44.07	11.11	335.7
302.8	0.233	1.847	47.80	40.84	19.27	300.0	202.1	0.268	1.840	47.64	43.19	12.07	291.3
302.8	0.100	1.847	47.79	38.82	18.72	223.0	202.1	0.136	1.840	47.64	42.26	13.01	258.2
302.8	0.017	1.846	47.79	34.75	15.22	121.9	202.1	0.034	1.840	47.64	40.14	14.04	197.4