

计算气液两相流含气率的一个二维二速度模型

刘尧奇 陈听宽 陈学俊

(西安交通大学)

摘 要

本文提出一个新的二维二速度气液两相流含气率模型,同时考虑了两相间存在相对速度及含气率和流速沿流通截面的分布规律这两个影响截面含气率的主要因素。分别对绝热流动和沸腾流动两种情况推导出了截面含气率与容积含气率之间的关系式,并对单组份汽液两相流建立了汽液相速度及含气率沿截面分布的分布指数与两相流动参数之间的关系。该模型改进了Bankoff变密度模型(Bankoff模型为本文模型当两相间相对速度为零时的特例),具有更大的适用范围,本文就垂直圆管内汽水两相向上流动的情况,确定了模型中的各系数,模型计算结果与试验数据及其它模型比较得到了较好的结果。

一、引 言

在核反应堆安全、火电站热能动力设备的正常运行、石油化工设备的高效运转及加工过程的合理进行等许多工程技术领域中,气液两相流是必须深入研究和全面了解的重要问题。截面含气率是气液两相流中一个非常重要的基本参数,它在很大程度上影响着两相流动特性及传热特性。因此,多年来世界各国的学者对两相流含气率进行了广泛的理论和试验研究,提出了各种理论模型。其中一类是以流速分布型线为基础提出的(如图 1 所示)。在分析含气率问题时,有两个重要因素应该予以考虑:其一为两相间相对速

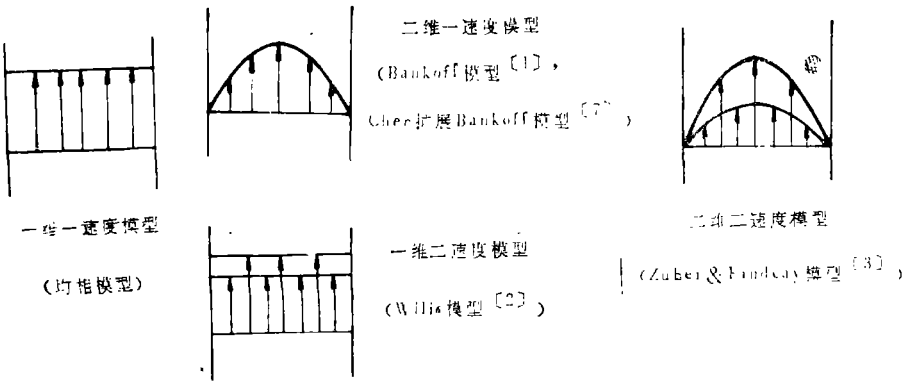


图 1 基于假想速度型线的含气率模型

1988年12月10日收到。

二、模型推导

2.1. 绝热流动情况

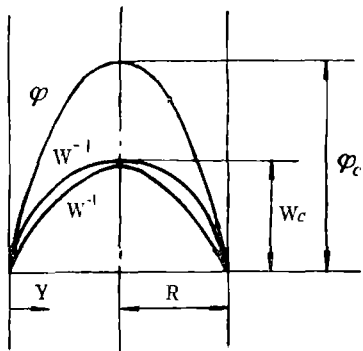
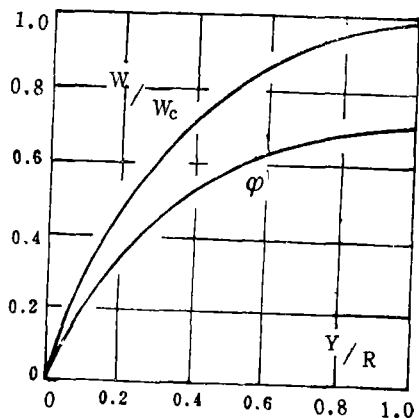


图 2 假想含气率及流速分布型

图 3 含气率和流速分布^[8]
$$w''/wc = (r/R)^{1/m} \quad (1a)$$

$$w'/wc = (y/R)^{1/1} \quad (1b)$$

$$\varphi / \varphi_c = (y / R)^{1/n} \quad (1c)$$

其中, R 为管半径; y 为径向上某点距壁面的

这样的指数分布在某些情况（如充分发展的泡状流动）下是存在的（如图3所示）^[6]。至于两相在管中心线上速度相等之假定的合理性可解释如下：当含气率较小时，气泡较少且较为均匀地分散在液相中，液相携同气泡一来流动（若质量流速不是很小），这时可认为二者具有相同的速度；当含气率较大时，气泡增多并趋于向管子中心集中，使中心

气速增大, 这时在管子中心出现气相夹带液相的流动情况, 故亦可认为二者具有相同的速度。

在式 (1) 的基础上就可推得:

$$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{A} \int_A \varphi dA = \varphi_0 \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V'' &= \int_A w'' dA'' = \int_A w'' \varphi dA \\ &= 2\pi R^2 w_0 \varphi_0 \frac{(mn)^2}{(m+n+mn)(m+n+2mn)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V' &= \int_A w' dA' = \int_A w' (1-\varphi) dA \\ &= 2\pi R^2 w_0 \left[\frac{l^2}{(l+1)(2l+1)} - \varphi_0 \frac{(ln)^2}{(l+n+ln)(l+n+2ln)} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{假定: } \varphi_0 \frac{(mn)^2}{(m+n+mn)(m+n+2mn)} \approx \varphi_0 \frac{(ln)^2}{(l+n+ln)(l+n+2ln)},$$

$$\text{则: } \langle \beta \rangle = \frac{V''}{V' + V''} = \varphi_0 \frac{(mn)^2 (l+1)(2l+1)}{l^2 (m+n+mn)(m+n+2mn)} \quad (5)$$

式 (2) 与式 (5) 相比, 则得:

$$\langle \varphi \rangle = \frac{2l^2 (m+n+mn)(m+n+2mn)}{m^2 (l+1)(2l+1)(n+1)(2n+1)} \langle \beta \rangle \quad (6)$$

式中, $\langle \varphi \rangle$ 为平均截面含气率, $\langle \beta \rangle$ 为容积含气率。

显然, 式 (6) 中当 $m=l$ 时, 该模型则简化为 Bankoff 变密度模型 (二维一速度模型)。

在本模型的假定条件下, 还可以得到滑移率沿截面分布的表达式:

$$S = (y/R)^{1/m-l+1} \quad (7)$$

及截面平均滑移率的表达式:

$$\langle S \rangle = \frac{2(ml)^2}{(l-m+ml)(l-m+2ml)} \quad (8)$$

2.2. 沸腾流动情况

对于沸腾流动 (绝大多数情况为单组份汽液两相流动), 管壁处因受热而不断有汽泡产生, 从而使管壁处含气率不再为零, 式 (1c) 不复成立。假定管壁处含气率为 φ_0 。将式 (1c) 改为:

$$\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_0 - \varphi_0} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1C')$$

速度分布仍用式 (1a)、(1b) 的型式。通过与前节类似的推导得:

$$\langle \varphi \rangle = (\varphi_c - \varphi_o) \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} + \varphi_o \tag{9}$$

$$V'' = 2\pi R^2 \omega_c \left[(\varphi_c - \varphi_o) \frac{(mn)^2}{(m+n+mn)(m+n+2mn)} + \varphi_o \frac{m^2}{(m+1)(2m+1)} \right] \tag{10}$$

$$V' = 2\pi R^2 \omega_c \left\{ \frac{l^2}{(l+1)(2l+1)} - \left[(\varphi_c - \varphi_o) \frac{(ln)^2}{(l+n+ln)(l+n+2ln)} + \varphi_o \frac{l^2}{(l+1)(2l+1)} \right] \right\} \tag{11}$$

假定式 (11) 与式 (10) 中, 中括号 [] 内的部分近似相等, 则:

$$\langle \beta \rangle = \frac{V''}{V' + V''} = (\varphi_o - \varphi_o) \frac{(mn)^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+n+mn)(m+n+2mn)} + \varphi_o \frac{m^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+1)(2m+1)}$$

进而假定: $\frac{m^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+1)(2m+1)} \approx 1$, 则:

$$\langle \beta \rangle = (\varphi_c - \varphi_o) \frac{(mn)^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+n+mn)(m+n+2mn)} + \varphi_o \tag{12}$$

式 (9) 与式 (12) 相比得:

$$\langle \varphi \rangle = \frac{\left(1 - \frac{\varphi_o}{\varphi_c}\right) \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} + \frac{\varphi_o}{\varphi_c}}{\left(\frac{\varphi_o}{\varphi_c}\right) \frac{(mn)^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+n+mn)(m+n+2mn)} + \frac{\varphi_o}{\varphi_c}} \langle \beta \rangle \tag{13}$$

当 $\varphi_o=0$ 时, 则上式结果与绝热流动情况下所得式 (6) 完全相同

根据文献 [7], 取 $\frac{\varphi_o}{\varphi_c} = \frac{0.04}{\langle \beta \rangle}$, 代入式 (13) 得:

$$\langle \varphi \rangle = \frac{(\langle \beta \rangle - 0.04) \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} + 0.04}{(\langle \beta \rangle - 0.04) \frac{(mn)^2(l+1)(2l+1)}{l^2(m+n+mn)(m+n+2mn)} + 0.04} \langle \beta \rangle \tag{14}$$

三、分布指数m、l、n的确定

我们知道, 在上升流及水平流中, 两相滑移率*S*总是 大于1, 即 $\langle \varphi \rangle$ 总是小于 $\langle \beta \rangle$ 而在下降流中, *S*可能大于1也可能小于1, 即 $\langle \varphi \rangle$ 可能大于、也可能 小于 $\langle \beta \rangle$ 。对 Bankoff模型, 在*m*、*n*可能的取值范围内 ($m = 2 \sim 7, n = 0.1 \sim 5$), $\langle \varphi \rangle$ 总是小于 $\langle \beta \rangle$ 的;而本文提出的模型在各指数可能的取值范围内($m = 2 \sim 7, l = 2 \sim 7, n = 0.1 \sim 5$),

$\langle \varphi \rangle$ 可以大于也可以小于 $\langle \beta \rangle$ 。因此, 本文模型比 Bankoff 模型具有更大的适用范围。原则上本文模型可用于各种直管内两相流截面含气率的计算(绝热流动的公式可用于单组份和双组份的各种两相流; 沸腾流动的公式可用于单组份两相流), 只是各分布指数需按具体情况而定。本文只对单组份两相流确定各分布指数的表达式。

在 Bankoff 模型给出的表达式中, $\langle \varphi \rangle / \langle \beta \rangle$ 只是压力的函数, 也即 m 和 n 只取决于压力(注: Bankoff 模型提出时, 只是针对单组份汽液两相流的)。而事实上, 因为浮力、惯性力、表面张力、压力、容积含气率及流体物性等参数(其中已包含了质量流速的影响)对分布指数均有影响, 所以各分布指数 m 、 n 及 l 应为上列参数的函数。即:

$$m, n, l = f(Fr, Re, We, p, \langle \beta \rangle \text{物性}) \tag{15}$$

对于热力学平衡的单组份两相液体, 压力一定则物性随之确定。因此文献〔7〕取 m 、 n 仅为 Fr 数及压力 p 的函数。但实际上, 式(15)中容积含气率 $\langle \beta \rangle$ 也是一个独立的参数, 所以本文取 m 、 n 、 l 为 Fr 数, 压力 p 及容积含气率 $\langle \beta \rangle$ 的函数。考虑到当 $\langle \beta \rangle \rightarrow 1$ 时, $\langle S \rangle \rightarrow 1$, 应有 $m = l$; 当 $\langle \beta \rangle \rightarrow 1$ 或 $p \rightarrow p_{cr}$ 时, $\frac{\langle \varphi \rangle}{\langle \beta \rangle} \rightarrow 1$, 应有 $n \rightarrow \infty$; 同时

为尽量简化, 假定:

$$m = l + a(1 - \langle \beta \rangle)^e \tag{16a}$$

$$l = C(Fr)^d \tag{16b}$$

$$n = \frac{1}{1 - \langle \beta \rangle^e} \left(\frac{p}{p_{cr} - p} \right)^f \tag{16c}$$

其中, 对绝热流动: $Fr = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right]$

对沸腾流动: $Fr = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D}$

式中, G 为质量流速, g 为重力加速度, D 为管内径, x 为蒸汽干度, ρ_l 、 ρ_g 分别为液相和汽相的密度, p_{cr} 为临界压力。

对于汽水两相向上流动的情况, 参考有关文献并根据已有试验数据可确定式(16)中系数如下:

$$a = 1, b = -0.01, c = 1, d = 0.3, e = 5, f = 1 \tag{17}$$

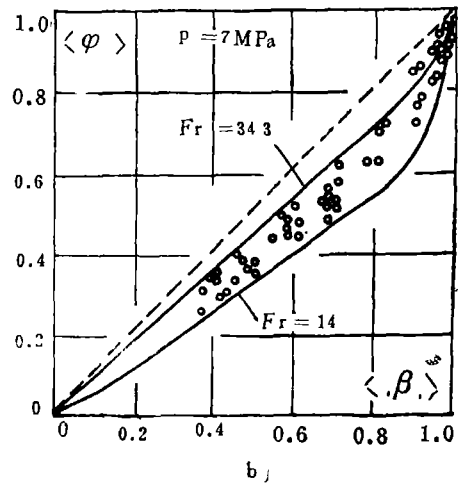
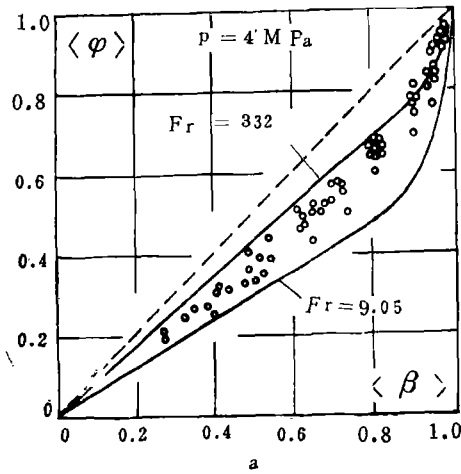
四、与试验数据及其它模型的比较

4.1. 与试验数据比较

这里引用文献中的部分汽水两相向上流动的试验数据(见表1)与本文模型进行比较。图4、图5中, 两条实线是根据试验数据中 Fr 数的最大和最小值用本文模型计算得到的。由图可见, 绝大多数试验点都落在本文模型按最大和最小 Fr 数的计算曲线范围内, 这说明本文模型能较好地与试验结果吻合。不过从图中可以看到, 在高 $\langle \varphi \rangle$ 区, 计算值稍低于试验值。

表 1 引用数据的试验范围

作 者	压 力 p (MPa)	干 度 x	质量流速 G ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	管径 D (mm)	热负荷 q (kw/m^2)	备 资
Kosterin, et al [9]	4~12	$\langle \beta \rangle =$ 0.2~0.99		17	0	绝热流动
Rouhani, et al [8]	0.7~6	0~0.38	650~2050	6	380~1200	沸腾流动
Haywood, et al [6]	1.7~14.5	0.003~0.17	750~1950	33	20~140	沸腾流动



4.2. 与其它公式比较

这里选取被广泛应用的Smith 公式^[10]以及考虑了 Fr 数对含汽率影响的Kowalczewski公式和 Kütükcuoğlu 公式^[11]及 Chen 公式^[17]进行比较。图 6 为在绝热情况下的比较（取 $Fr=100$ ），由之可见，本文模型能与其它公式较好地符合，只在高 $\langle \varphi \rangle$ 区偏低於其它公式计算值，但随压力增高，各公式计算值趋于接近，尤其是本文模型与 Smith 公式及 Kowalczewski 公式非常接近。对沸腾流动情况比较可得到类似的结果。

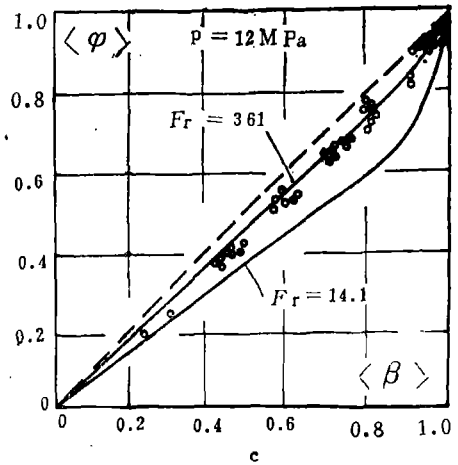
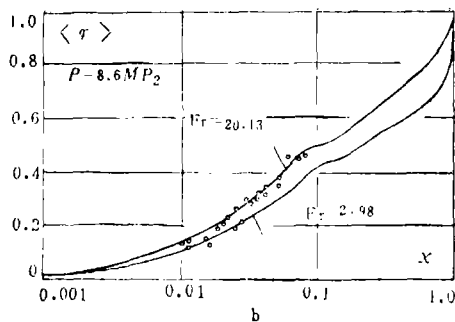
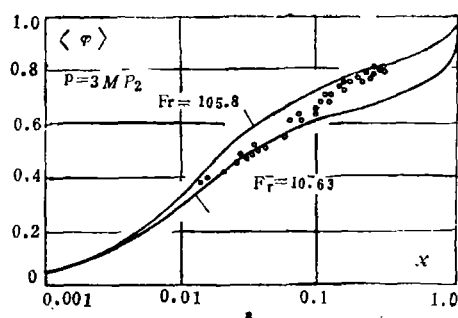


图 4 与 Kosterin 等的绝热试验数据[9]比较

五、对模型适用范围的讨论

已有不少含气率模型具有 $\langle \varphi \rangle / \langle \beta \rangle = K$ 的形式，只不过各模型计算 K 值的方法不同。如 Apmahu^[12] 用经验关系式确定， $K = f(p)$ ；苏联锅炉水力计算标准方法^[13]



则以图线形式给出, $K = f(p, w_m)$ (其中 w_m 为两相混合物速度); 而 Bankoff 则是在二维一速度模型假定下得到 K 为流速及含气率的分布指数的函数, 但 Bankoff 指出, K 对于分布指数的选择不大敏感, 所以并没有进一步去确定分布指数, 而是综合认为 $K = f(p)$, 并指出, 当 $K = 0.89$ 时, 能与汽水试验数据很好吻合。

本文建立的模型也具有 $\langle \varphi \rangle / \langle \beta \rangle = K$ 的形式, 所以第 2 节所作假定及推导实际上是建立了一种确定 K 值的方法。这些假定

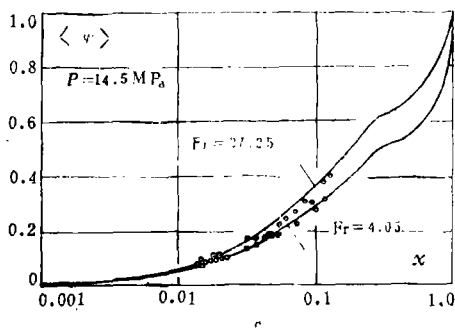


图 5 与 Rouhani 等[7] 及 Haywood 等[6] 的沸腾试验数据比较

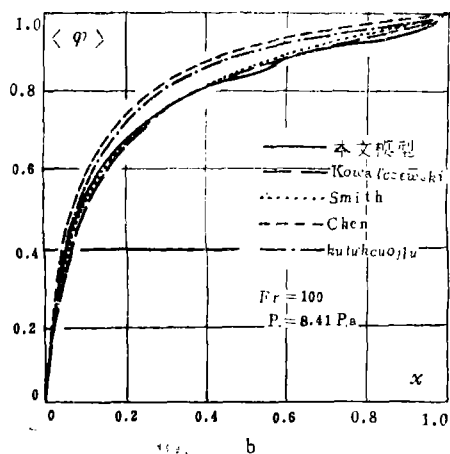
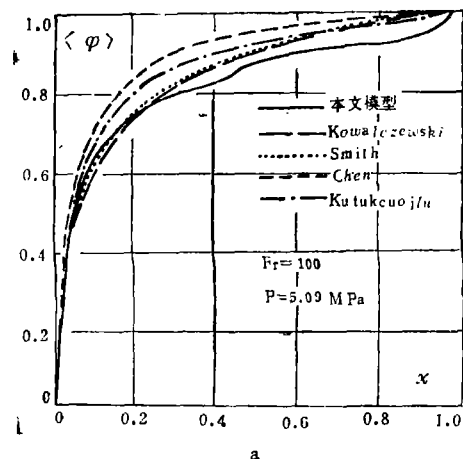


图 6 本文模型与其它公式[11]比较

看上去具有较大的局限性, 因为图 2 所示的指数分布只在泡状流动中才能存在, 但是它们并没有给本文模型的适用范围带来太大的局限性。这主要是因为:

(1) 有时一些理论或半理论模型所提出的假定只是为了使问题得到简化, 给建立模型提供方便。它们具有一定的合理性, 同时又具有一定的局限性。但是, 在一个问题中, 常常是许多因素在同时起作用, 因此有时会因为其它因素的作用很强而削弱了假定条件的影响, 使得最终结果并不具有假定条件所具有的局限性。尤其对一些复杂的问题更是

这样。如Bankoff模型也假定速度及含气率为指数分布,按理只适用于泡状流动,但实际上模型却能在假定 K 为常数的情况下仍然与 $\langle\varphi\rangle < 0.85$ 的试验数据很好吻合,而这一范围显然已远远超出泡状流区域。这就是由于两相流的复杂因素造成的。又如两相流分相模型基本方程一般是在分层流动情况下推导出的,但却可推广应用到其它各种流型。

(2) 本文假定的速度和含气率分布是以局部参数的形式给出的,只有当分布指数为常数时,才为类似图2所示的泡状流分布型。但本文不同于Bankoff等的模型,不认为分布指数为常数或只是压力的函数,而是若干个流动参数的函数。当流动参数代之以局部值时,则可得到局部的分布指数值。这样,在不同的流型下,截面上各点流动参数不同,分布指数亦不同,从整个截面上看,就会组合成各种分布型线,而并不总是图2所示的单一型线。因为,本文模型可适用于比泡状流更宽的范围就是理所当然的。另外,不象其它几个模型、当 $\langle\beta\rangle = 1$ 时, $\langle\varphi\rangle \neq 1$,本文模型可以通过恰当地确定分布指数的值而使得当 $\langle\beta\rangle = 1$ 时 $K = 1$,从而 $\langle\varphi\rangle = 1$,使本文模型可适用于含气率从0到1的整个范围。第4节中与试验数据比较的结果就能证明这一点。那些存在的偏差只能说明分布指数关系式还不够准确或者试验数据亦有较大偏差。

(3) 本文模型比Bankoff等的模型有更大的适用范围还表现在:其它模型 K 值均小于1,如Bankoff模型在分布指数可能的取值范围内 K 值在0.58~0.98之间,而本文模型的 K 值在0.55~1.45之间,从而使本文模型可以扩大到适用于下降流动。而且本文模型的 K 值对分布指数是颇为敏感的。

综上所述,只要能适当地确定分布指数与流动参数之间的关系,本文模型即可应用于各种直管中处于各种流型的气液两相流动的截面含气率计算。

六、结 论

(1) 本文提出的二维二速度气液两相流含气率模型,在理论上比Bankoff等的二维一速度模型完善了一步,且具有更大的适用范围。原则上可用于各种直管内各种流型两相流截面含气率的计算(绝热流动公式可用于单组份和双组份两相流,沸腾流动公式可用于单组份两相流),只是模型中各分布指数需按具体情况而定。

(2) 本文对单组份汽液两相流,确定了各分布指数与流动参数之间的关系。并就汽水两相向上流动的情况,具体确定了模型中各系数的值,模型与试验数据及其它公式的吻合程度良好。

参 考 文 献

- [1] Bankoff, S.G., ASME. Ser. C, No.4, (1960).
- [2] Wallis, G.B., One-Dimensional Two-Phase Flow, McGraw Hill Book Co., New York, (1969).
- [3] Zuber, N. and Findlay, J.A., ASME. Ser. C, No.4, (1965).
- [4] Jaroschek, K. and Brandt, T., Brennstoff Warme Kraft, p407, (1959).
- [5] Levy, S., ASME. Ser. C, Vol.82, No.8, p114, (1960).
- [6] Haywood, R.W., et al, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 175, No.13, p669, (1961)

- [7] Chen Lixun, in «Two-Phase Flow and Heat Transfer» China—U.S. Progress,
edited by Chen, X. J. and Veziroglu, T. N., Hemisphere Publication Co., New
York, (1985).
- [8] Rouhani, S.Z. and Becker, K.M., AE—106.
- [9] Kosterin, S. I., et al, Teploenergetika, Vol. 8, No.1, p58, (1961).
- [10] Smith, S. L., *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 184, Pt1, p647, (1969).
- [11] Friedel, L., in «Two-Phase Flow and Heat Transfer», Vol. 1, p239, edited by
Kakas, S. and Mayinger, F., (1976).
- [12] Арманд, А.А., Известия ВТИ, No.4, (1947).
- [13] Локшин, В.А.等著, 董祖康等译, 锅炉机组水力计算标准方法, 电力工业出版社, (1981)

A TWO-DIMENSION TWO-VELOCITY MODEL FOR GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW VOID FRACTION

LIU YAOQI CHEN TINGKUAN CHEN XUEJUN

(Xi'an Jiaotong University)

(Manuscript received 10 December, 1988)

ABSTRACT

A two-dimension two-velocity model for gas-liquid two-phase flow void fraction is established in which two main factors, the distributions of local void fraction and flow velocities in the flow cross section and the relative velocity between two phases, are considered at the same time. The correlations between mean void fraction and volumetric fraction are obtained for adiabatic flow and diabatic flow respectively. As to single component vapour-liquid two-phase flow, the relations between each distribution index in the model and the flow parameters are determined. This model is more complete than Bankoff's model in theory (Bankoff's model is a special form of the present model when there is no relative velocity between two phases). And it can be used in wider range and more flow cases. For steam-water two-phase vertically upward flow in round tubes, the values of the coefficients in the model are given according to experimental data. Comparisons show that the present model can coincide well with experimental data and other models.

核科学与工程

第10卷 第1期 1990年3月

作者简介

重水研究堆HWRR堆芯燃料管理的优化



金华晋 1966年毕业于西安交通大学反应堆工程专业，高级工程师。

朱焕南 1956年毕业于北京大学物理系，高级工程师（照片见第5卷第2期）。

计算气液两相流含气率的一个二维二速度模型

刘尧奇 1983年毕业于西安交通大学热能工程专业，1989年获工学博士学位，讲师。



陈听宽 1956年毕业于上海交通大学锅炉专业，1960年西安交通大学研究生毕业，教授，国家级有突出贡献中青年专家。

陈学俊 1939年毕业于中央大学，1946年美国普渡大学研究院毕业，获硕士学位，中国科学院学部委员，教授。



104405