

周期性力场作用下窄通道内两相流压降特性

幸莫川, 阎昌琪, 孙立成, 金光远, 王 洋

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:通过实验研究了摇摆造成的周期性附加惯性力作用下矩形窄通道内空气-水两相流压降特性。按分液相雷诺数将流动分为层流区($Re_f < 800$)、过渡区($800 \leq Re_f \leq 1400$)及湍流区($Re_f > 1400$)3个区域,并对各区域内附加压降、重位压降和摩擦压降平均值及瞬态值进行了比较。结果表明,附加惯性力对窄通道内两相流整数倍周期内平均摩擦阻力无明显影响。周期性附加惯性力作用下(摇摆周期16 s, 摇摆振幅 30°),层流区及过渡区气相表观速度、液相表观速度、质量含气率及摩擦压降随时间周期性波动,波动周期等于摇摆运动周期;瞬时摩擦压降相对于其平均值的波动幅值随气液两相流速的增加而减小。湍流区两相流动参数周期性波动不明显。

关键词:附加惯性力;两相流;压降组分;矩形窄通道

中图分类号:TL334

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)S0-0271-06

Investigation on Characteristics of Two-Phase Flow Pressure Drop in Narrow Channel Subject to Periodical Force

XING Dian-chuan, YAN Chang-qi, SUN Li-cheng, JIN Guang-yuan, WANG Yang

(National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Characteristics of air-water two-phase flow pressure drop in narrow rectangular channel subjected to periodical additional inertia force caused by rolling motion were investigated experimentally. Time averaged and transient additional pressure drop, gravitational pressure drop and frictional pressure drop were compared in three different flow regions, namely, laminar flow region ($Re_f < 800$), transition flow region ($800 \leq Re_f \leq 1400$) and turbulent flow region ($Re_f > 1400$). The results show that additional inertial force nearly has no influence on time-averaged frictional pressure drop in multiple rolling periods. Under periodical force condition (rolling period 16 s; rolling amplitude 30°), the superficial gas and liquid velocity, mass quality and frictional pressure drop fluctuate with the same periods of rolling motion, and the fluctuation amplitude of transient frictional pressure drop against its averaged value decrease as the gas and liquid velocity increase both in laminar and transition flow region. For the case in turbulent

flow region, two-phase flow parameters have no evident periodical oscillation.

Key words: additional inertia force; two-phase flow; pressure drop component; narrow rectangular channel

受海浪的冲击作用,船舶等在运行过程中会出现摇摆、起伏、偏航等附加运动。航空设备在近地面着陆区受不稳定气流的冲击也会发生振动,或俯仰等附加运动。这些附加运动对传热管内热工水力特性的影响主要有两方面:一方面会产生附加惯性力,从而引起附加压降^[1-4];另一方面会使载体倾斜,引起沿流动方向重力分量及重力压降的周期性改变^[3-4]。周期性附加外力的作用可能会导致冷却剂热工水力特性的改变,从而给非稳态条件下动力装置的设计和运行带来不便。摇摆作为一种十分典型的船舶附加运动,其对核反应堆热工水力特性的影响近年来受到科研工作者的广泛关注^[1-7]。

矩形窄通道已被广泛应用于动力工程及核工程等领域。随着高热流密度换热器的发展,单相对流换热已不能满足工程需求,因此,国内外学者对矩形窄通道内两相流动特性开展了大量研究^[8-10]。目前,周期性附加惯性力条件下两相流研究主要针对气泡受力、流型及空泡份额等^[2,7,11-12]。文献[13]对摇摆条件下水平圆管内空气-水两相流摩擦压降特性进行了实验研究,并对奇斯霍姆关系式中的 C 值进行了修正,但未指明瞬时摩擦压降与摇摆角度之间的对应关系。周期性外力作用下窄通道内两相流

压降特性的研究目前未见公开文献。因此,开展相关研究工作对工程应用及学术研究具有十分重要的意义。

1 实验装置简介

本文采用的液压摇摆台与文献[4,7]中相同,实验段安装方位示于图1a。实验回路示于图1b。其中,实线和虚线分别代表水回路和气回路。减压阀将气相入口表压稳定为0.2 MPa。气液混合物垂直于摇摆台向上进入实验段,实验段顶端通大气,空气释放到大气中,水依靠重力流回水箱循环使用。实验段为有机玻璃矩形通道,尺寸为2 000 mm×43 mm×1.41 mm(长×宽×高)。实验段垂直于摇摆台安放,宽边垂直于摇摆轴,中心线与摇摆轴距离 $y'_1 = 1.1$ m(图1a)。宽边中心设置取压孔,上下两个取压孔与摇摆台面的距离分别为 $z'_2 = 2.0$ m和 $z'_1 = 0.5$ m,上游取压孔距实验段入口0.3 m。采用PR35X型压力传感器测量压力,精度为0.1级。气液流量采用精度为0.2级的质量流量计测量;温度采用二级标准温度计测量,水温在水箱回水口取样测量,气温以室温为准。流量、压力及瞬时摇摆角度信号采用NI采集系统存储,采样频率为256 Hz,采样时间大于4

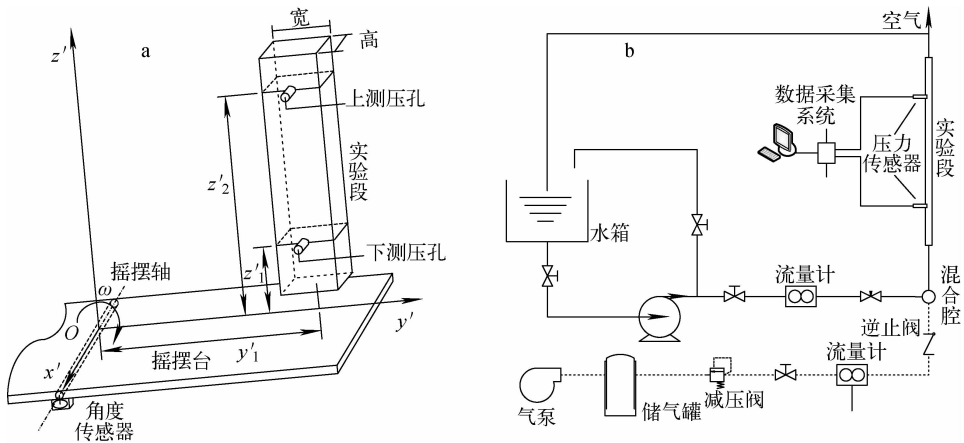


图1 摇摆台及实验回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rolling platform and experimental loop

a——摇摆台;b——实验回路

个整周期。

实验在常压和室温条件下进行,气液两相表观速度分别为 0.23~33.89 m/s 和 0.07~4.63 m/s。摇摆工况(摇摆振幅,摇摆周期)为: 10°,8 s;10°,12 s;10°,16 s;15°,16 s;30°,16 s。

2 周期性力场作用下压降组分

摇摆运动引起的周期性外力场作用下绝热两相流动总压降 Δp_t 包括摩擦压降 Δp_f 、重位压降 Δp_g 和附加压降 Δp_a 3 部分:

$$\Delta p_t = \Delta p_g + \Delta p_f + \Delta p_a \quad (1)$$

重位压降可按下式计算:

$$\Delta p_g = \rho g L \cos \theta \quad (2)$$

两相真实密度 ρ 为:

$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha) \quad (3)$$

其中: ρ_g 和 ρ_l 分别为气密度和液密度; α 为截面含气率, Jones 等^[14] 提出如下关系式:

$$j_g/\alpha = C_0 j + (0.23 + 0.13s/w) \sqrt{\Delta \rho g w / \rho_l} \quad (4)$$

C_0 为分布参数,采用下式^[15] 计算:

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad (5)$$

式中: j_g 为气相表观速度; j 为表观速度, m/s; s 和 w 分别为矩形通道的高和宽, m; $\Delta \rho$ 为气液两相密度差, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

参考文献^[16], 实验段取压孔间的 Δp_a 为:

$$\Delta p_a = \rho \frac{(z_2' - z_1')}{2} \cdot \frac{4\pi^2 \theta_m^2}{T^2} \cos^2 \frac{2\pi t}{T} + \rho y_1' (z_2' - z_1') \cdot \frac{4\pi^2 \theta_m}{T^2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (6)$$

式中: θ_m 为摇摆振幅, rad; T 为摇摆周期, s; t 为时间。

采用分相流模型对数据进行处理,分液相折算系数 ϕ_l^2 及马蒂内里参数 X 按式(7)、(8)计算:

$$\phi_l^2 = \Delta p_f / (\Delta p_f)_l \quad (7)$$

$$X^2 = (\Delta p_f)_l / (\Delta p_f)_g \quad (8)$$

其中, $(\Delta p_f)_g$ 和 $(\Delta p_f)_l$ 分别为分气相和分液相摩擦压降。关于矩形通道内分相摩擦压降计算及相关雷诺数分界参见文献^[9]。

摇摆引起的周期性外力作用下两相流附加压降和重位压降均随时间周期性波动,分液相雷诺数小于 1 400 时摩擦压降也呈周期性波动(图 2)。图 2 中, $Re_{fg} = 940$, $Re_g = 1 566$ 。附加压降及摩擦压降波动周期等于摇摆周期,重位压降波动周期等于摇摆周期的一半。式(6)右边第 1 项代表法向惯性力产生的附加压降,始终为非负值;第 2 项代表切向惯性力产生的附加压降,随时间正弦波动。切向惯性力产生的附加压降波动幅值大于法向惯性力附加压降,因此总的效果使得附加压降偏离正弦波动。附加压降幅值比重位压降小 1~2 个数量级,且随着质量含气率的增加,通道内两相真实密度减小,附加压降和重位压降减小,但相应的摩擦压降大幅增加,此时,总压降中附加压降及重位压降所占的份额很小。

在本实验参数范围内,附加压降及重位压降在整数倍周期内的平均值列于表 1(密度按室温下单相水计算)。显然,附加压降平均值随摇摆周期减小而增大,随摇摆振幅增加而增大,平均重位压降仅随摇摆振幅增加而减小,随摇摆周期无明显变化。附加压降平均值比重位压降平均值小 2~3 个数量级,附加惯性力对两相流动平均阻力的影响极其微弱。

3 实验结果分析

3.1 竖直实验结果

竖直状态下矩形窄通道内两相流阻力实验结果示于图 3,其中的 C 指奇斯霍姆关系式中根据气液两相流动状态确定的值。分液相折算系数随马蒂内里参数的变化根据不同的分液相 Re_l 明显分为 3 个区域,即层流区 ($Re_l < 800$)、过渡区 ($800 \leq Re_l \leq 1 400$) 和湍流区 ($Re_l > 1 400$)。

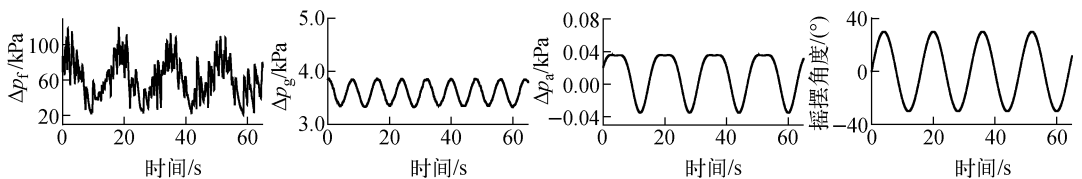


图 2 周期性力作用下压降组分

Fig. 2 Pressure drop component subject to periodical force

表 1 平均附加压降及重力压降

Table 1 Averaged additional and gravitational pressure drop

摇摆振幅/(°)	摇摆周期/s	压降平均值/kPa	
		附加压降	重力压降
10	8	0.018	14.587
10	12	0.008	14.588
10	16	0.004	14.588
15	16	0.010	14.449
30	16	0.040	13.708

近期矩形小通道及窄通道内空气-水两相流研究结果也表明上述分区有较好的规律^[9-10]。同时由图3可见,稳定状态下 Lee-Lee 模型^[8]由于考虑了表面张力的作用,有较好的适应性,其预测结果与实验结果平均绝对误差(误差绝对值与实验值百分比的平均值)为 14.43%,其中 94.57%的实验数据落在预测值 $\pm 25\%$ 的范围内,满足两相流实验精度要求,充分说明实验回路、仪表及采集系统运行稳定可靠。

3.2 周期性外力作用下两相流动参数

摇摆运动造成的周期性附加惯性力作用下两相流动参数示于图4。图4中, j_{if} 为液相表观流速。绝热流动中,分相雷诺数与折算速度一一对应,在此采用分气相和分液相雷诺数表示气液两相流速。由图4可知,周期性附加惯性力作用下液相流速较低时(过渡区和层流区)气液两相流速随时间周期性波动,液相流速波动幅值随气相流速增加而有所增加,但二者并不

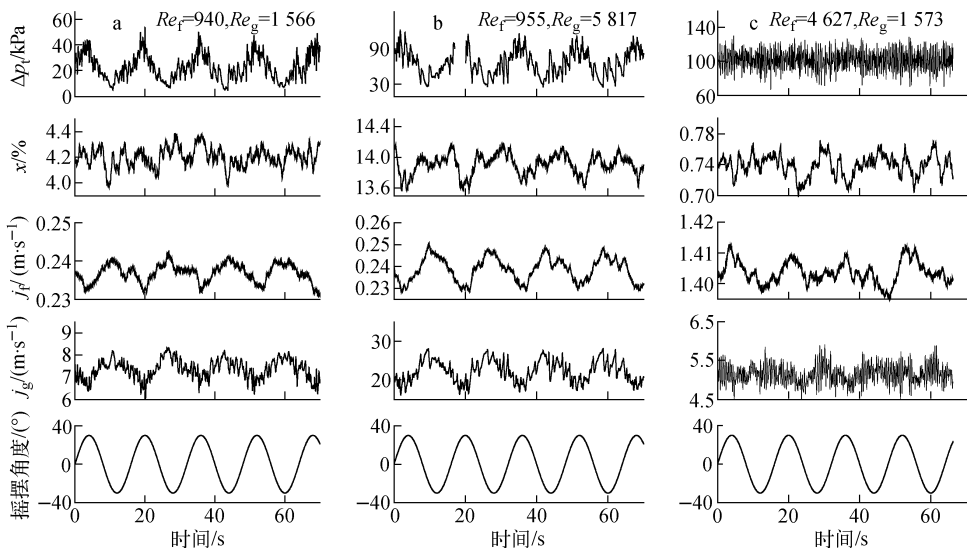


图 4 周期性外力作用下流动参数特性

Fig. 4 Flow parameters characteristics subject to periodical forces

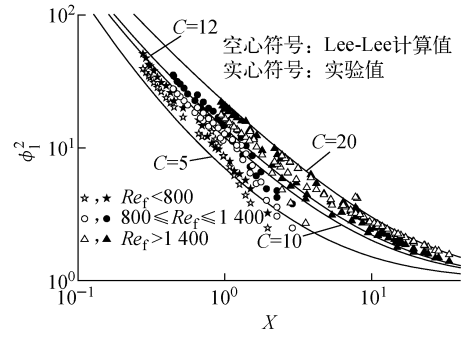


图 3 稳定竖直状态下实验结果

Fig. 3 Experimental results under steady vertical condition

存在明显的相位滞后。总压降呈明显的周期性波动,且波动幅值随着气相流速的增加而增大。质量含气率随流速的增加周期性波动越发明显。液相流速较高时(湍流区),气液两相流速及质量含气率随时间周期性波动不明显,总压降不随时间周期性波动(图4c)。增加液相流速能抑制附加惯性力对两相流动参数波动的影响。

3.3 周期性外力对平均摩擦阻力的影响

摇摆引起的附加惯性力对平均摩擦阻力的影响示于图5。由图5可见,在各区域内,不同的摇摆振幅和摇摆周期,即不同附加惯性力对矩形窄通道内平均摩擦阻力无明显影响。类似于稳定状态下窄通道内摩擦阻力特性,摇摆条件下平均分液相折算系数随马蒂内里参数的变

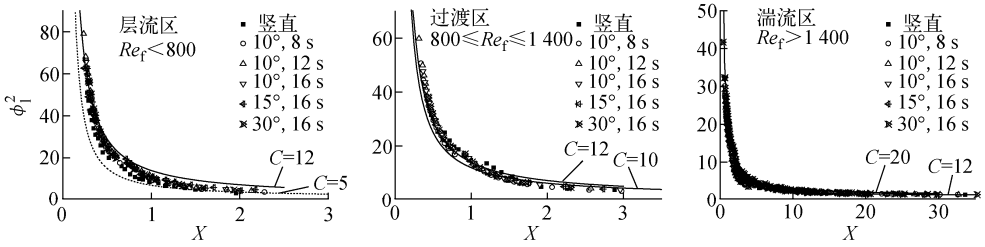


图5 周期性外力对平均摩擦阻力的影响

Fig. 5 Effects of periodical forces on averaged frictional resistance

化也明显的分为3个区域。尽管在层流区及过渡区内周期性外力导致各流动参数周期性波动,但气液两相流量及摩擦压降平均值相对于稳定状态十分接近。这与摇摆条件下单相平均摩擦阻力特性相类似^[4,6]。

3.4 周期性外力作用下瞬时摩擦压降

不同气液相流速下附加惯性力导致的摩擦压降波动现象示于图6。为便于研究摩擦压降波动幅值的相对大小,定义相对摩擦压降为瞬时摩擦压降与相应工况时间平均值之比。周期

性附加惯性力作用下矩形窄通道内两相流动相对摩擦压降在层流区及过渡区呈明显的周期性波动,波动幅值随液相流速增加而迅速减小。尽管摩擦压降波动幅度随气相流速增加而增大,但此时两相流动摩擦阻力急剧增大,相对摩擦压降仍呈减小趋势。湍流区摩擦压降周期性波动不明显。液相流速对相对摩擦压降波动幅值的影响明显比气相流速大。同时,图6a、b表明,瞬时摩擦压降波动和引起附加惯性力的摇摆运动无明显的相位滞后。

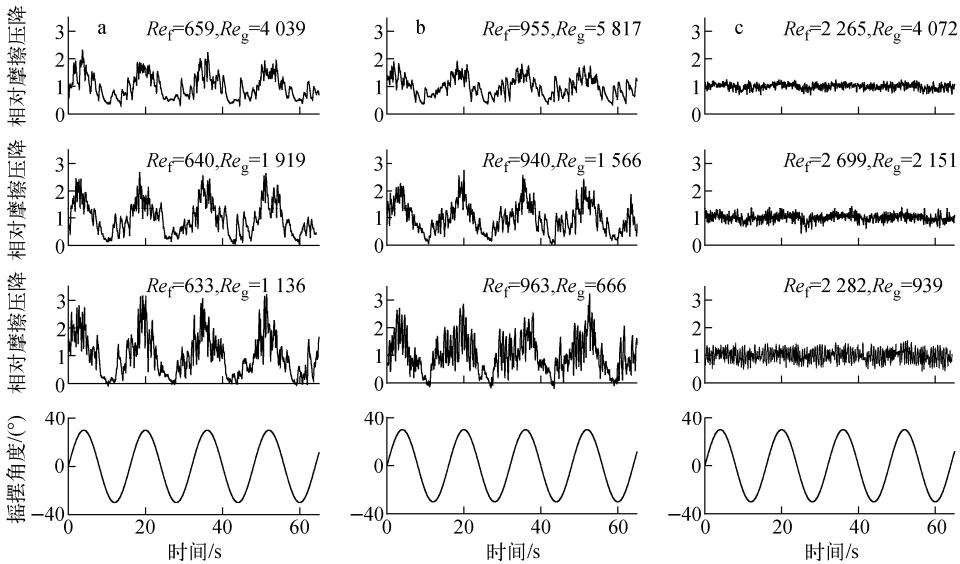


图6 气液流速对摩擦压降波动的影响

Fig. 6 Effects of gas and liquid velocity on frictional pressure drop fluctuation

a——层流区; b——过渡区; c——湍流区

4 结论

1) 竖直及摇摆条件下矩形窄通道内两相流动按分液相雷诺数分为层流区、过渡区及湍流区3个区域。

2) 摇摆条件下附加压降波动幅值比重位

压降小1~2个量级,而重位压降相对于摩擦压降很小。本实验参数范围内,摇摆运动导致的惯性力对窄通道内两相流动平均摩擦阻力特性无明显影响。

3) 摇摆条件下层流区及过渡区摩擦压降

周期性波动,相对于其平均值的波动幅度随气液相流速增大而减小;湍流区摩擦压降周期性波动不明显。

参考文献:

- [1] ZHANG J H, YAN C Q, GAO P Z. Characteristics of pressure drop and correlation of friction factors for single-phase flow in rolling horizontal pipe [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2009, 21(5): 614-621.
- [2] WEI J H, PAN L M, CHEN D Q, et al. Numerical simulation of bubble behaviors in subcooled flow boiling under swing motion[J]. *Nuclear Engineering Design*, 2011, 241: 2 898-2 908.
- [3] 谭思超,张红岩,庞凤阁,等. 摇摆运动下单相自然循环流动特点[J]. *核动力工程*, 2005, 26(6): 559-564.
- TAN Sichao, ZHANG Hongyan, PANG Fengge, et al. Characteristics of single-phase natural circulation under rolling[J]. *Nucl Power Eng*, 2005, 26(6): 559-564(in Chinese).
- [4] XING D C, YAN C Q, SUN L C, et al. Effects of rolling on characteristics of single-phase water flow in narrow rectangular ducts [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 247: 221-229.
- [5] 幸奠川,阎昌琪,曹夏昕,等. 摇摆条件下单相水强制循环阻力特性实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(6): 672-676.
- XING Dianchuan, YAN Changqi, CAO Xiixin, et al. Experimental study on forced circulation resistance characteristics of single-phase water flow under rolling condition [J]. *Atom Energy Sci Tech*, 2011, 45(6): 672-676(in Chinese).
- [6] YAN B H, YU L, YANG Y H. Effects of rolling on laminar frictional resistance in tubes[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(3): 295-301.
- [7] 王广飞,阎昌琪,曹夏昕,等. 摇摆状态下窄矩形通道内两相流流型特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(11): 1 329-1 334.
- WANG Guangfei, YAN Changqi, CAO Xiixin, et al. Flow pattern characteristics of two-phase flow through narrow rectangular channel under rolling condition [J]. *Atom Energy Sci Tech*, 2011, 45(11): 1 329-1 334(in Chinese).
- [8] LEE H J, LEE S Y. Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(5): 783-796.
- [9] 王广飞,阎昌琪,孙立成,等. 窄矩形通道内两相流动压降特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(12): 1 431-1 436.
- WANG Guangfei, YAN Changqi, SUN Licheng, et al. Resistance characteristics of two-phase flow through narrow rectangular duct[J]. *Atom Energy Sci Tech*, 2011, 45(12): 1 431-1 436(in Chinese).
- [10] 周云龙,王红波. 矩形小通道内气液两相流垂直向上流动特性[J]. *化工学报*, 2011, 62(5): 1 226-1 230.
- ZHOU Yunlong, WANG Hongbo. Flow characteristics of gas-liquid two-phase flow in small vertical rectangular channel[J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(5): 1 431-1 436(in Chinese).
- [11] 潘良明,张文志,陈德奇,等. 附加惯性力对气泡破裂的影响[J]. *核动力工程*, 2011, 32(4): 37-41.
- PAN Liangming, ZHANG Wenzhi, CHEN Deqi, et al. Effects of additional inertia force on bubbly breakup[J]. *Nucl Power Eng*, 2011, 32(4): 37-41(in Chinese).
- [12] 曹夏昕. 摇摆对竖直接管内气液两相流型的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [13] 张金红. 摇摆状态下气水两相流流型及阻力特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [14] JONES O C, ZUBER N. Slug-annular transition with particular reference to narrow rectangular ducts [C] // *Two-Phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical, Process and Energy Engineering Systems*. Washington D. C. : [s. n.], 1979: 345-355.
- [15] ISHII M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two phase flow regimes, ANL-77-47[R]. USA: ANL, 1977.
- [16] 高璞珍,庞凤阁,王兆祥. 核动力装置一回路冷却剂受海洋条件影响的数学模型[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1997, 18(1): 24-27.
- GAO Puzhen, PANG Fengge, WANG Zhaoxiang. Mathematical model of primary coolant in nuclear power plant influenced by ocean conditions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1997, 18(1): 24-27(in Chinese).