

用 VOF 方法模拟横流下窄缝紊动射流

袁丽蓉¹, 沈永明¹, 郑永红²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510070)

摘要: 采用标准双方程 $k-\epsilon$ 紊流模型和 VOF 方法建立二维数值模型, 模拟有横流情况下底部排污问题. 将回流区的分析结果与试验进行了对比, 吻合较好. 分别将速度和浓度轨迹线拟合成简单的表达式并与试验拟合作了比较. 通过对速度和浓度场的分析得到一些有益的结论.

关键词: 窄缝; 紊动射流; VOF 方法; 横向流动; 浓度

中图分类号:X143:TV131

文献标识码: A

文章编号:0253-4193(2005)04-0155-06

1 引言

射流是常用的排污方式,利用射流的动量和浮力可以使污水和环境流体快速混合,降低其浓度.电厂冷却水、城市污水等常以射流形式排入江河、湖海.对于静止环境中的简单射流情况,已经有许多试验研究,并且取得了可靠的试验资料.对于浮力射流和横流中的射流也有一些试验研究^[1~4].理论分析计算方面主要有积分法、相似分析法和数值算法.积分法和相似分析法主要适用于简单射流型的湍流运动,对于具有复杂边界的流动和非均匀的横流,它们都难以处理.随着计算机的发展和计算方法的改进,数值算法得到普遍应用.一些高阶的湍流模型的提出,使得湍流精度大大提高.槐文信等^[5]、张晓元等^[6]用 $k-\epsilon$ 方程对静止环境和横流环境中的射流进行过试验和计算;杨志峰^[7]对潮汐流动中垂向排放作过研究;赵明登和郑邦民^[8]计算分析了横流中底部排污混合区问题;梁书秀等^[9]用应力代数模型对潮汐水域中污水侧向排放进行了数值模拟,但是他们或者回避自由面的问题,只计算小动量比的射流,或者对自由面作了很大的简化,采用刚盖假定等方法,往往使计算结果不够理想.横流中底部射流近

区属于紊动射流,如图 1 所示,紊动射流中心线会发生弯曲,并且在下游形成回流区.对于这种具有起伏自由面的较复杂的流动,本文采用 $k-\epsilon$ 紊流模型^[10]及 VOF(volume of fluid)方法^[11],可以对动量比较大、水面具有较大波动的射流作更准确的计算.

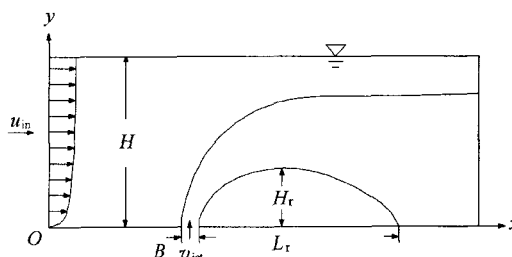


图 1 横流底部排污示意图

2 数学模型

2.1 基本方程

实际水域环境中的流动几乎都是紊流,虽然紊流运动是一种非常不规则的非线性随机流动,但是它的瞬时运动规律仍可由 Navier-Stokes 方程来描述^[10],忽略密度脉动及输运系数脉动,对瞬态方程中各变量进行雷诺分解,再作时间平均可得到雷诺

收稿日期: 2003-05-09; 修订日期: 2003-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10332050); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2005CB724202); 辽宁省自然科学基金资助项目(20042153)。

作者简介:袁丽蓉(1976—),女,湖南省邵阳县人,博士生,从事环境水力学方面的研究工作, E-mail: yuanlr@student.dlut.edu.cn

时均值方程组. 采用 $k-\epsilon$ 紊流模型封闭雷诺时均方程, 应用 VOF 方法^[11] 处理自由面, 可得模型的基本方程. 为了数学描述及数值计算的方便, 可将这些微分方程用统一的形式来表示. 在二维直角坐标系下, 这些方程有如下的通用形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial (v\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}, \quad (1)$$

式中, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量; ϕ 为问题的因变量; Γ_{ϕ} 为扩散系数; S_{ϕ} 为源项. 当 ϕ 表示某一特定量时, Γ_{ϕ} 和 S_{ϕ} 对此特定量有其特定的意义和表达式, 这时方程(1)亦赋予特定的意义, 如表 1 所示.

表 1 模型的基本方程

方程	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
体积函数	F	0	0
连续	1	0	0
x -动量	u	$\nu + \nu_t$	$\frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{\partial p}{\partial x}$
y -动量	v	$\nu + \nu_t$	$\frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + g$
污染物浓度	C	$(\nu + \nu_t) / \sigma_C$	0
紊动动能	k	$(\nu + \nu_t) / \sigma_k$	$G - \epsilon$
紊动动能耗散率	ϵ	$(\nu + \nu_t) / \sigma_{\epsilon}$	$C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k}$

表内的式中,

$$\nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (2)$$

$$G = \nu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中, p 为流体内部压力; ν 为水体的运动黏滞系数; ν_t 为紊动黏性系数; g 为重力加速度; C_{μ} , C_{ϵ_1} , C_{ϵ_2} , σ_C , σ_k , σ_{ϵ} 为经验常数, 按文献^[10]取值: $C_{\mu} = 0.09$, $C_{\epsilon_1} = 1.44$, $C_{\epsilon_2} = 1.92$, $\sigma_C = 1.0$, $\sigma_k = 1.0$ 和 $\sigma_{\epsilon} = 1.3$. 这些经验常数均由基本实验确定, 不依赖于特定的问题, 具有较好的通用性^[10].

2.2 边界条件

如图 1 所示, 求解区域的边界由上游进口边界、底部射流口边界、下游出口边界、壁面边界和自由面边界五部分组成, 图中 H 为原始水深, u_{in} 为横流平均速度, v_{jet} 为射流入射速度, H_r 和 L_r 分别为回流区高度和长度.

(1) 上游进口边界. 流速、紊动特征量、浓度按本质性边界条件给出, 即 $u = u_{in}$, $v = 0$, $C = 0$, $k = 0.005 u_{in}^2$, $\epsilon = C_{\mu} k^{\frac{3}{2}} / 0.04 H$.

(2) 底部射流口边界. 流速、紊动特征量、浓度按本质性边界条件给出, 即 $u = 0$, $u = v_{jet}$, $C = C_{jet}$, $k = 0.005 v_{jet}^2$, $\epsilon = C_{\mu} k^{\frac{3}{2}} / 0.04 B$.

(3) 下游出口边界. 流动在此处已经比较均匀,

各物理量沿程变化很小, 按充分发展条件给出, 即各物理量沿出口法向的梯度为 0.

(4) 壁面边界. 采用黏性无滑移条件, 并且假定没有质量或热量交换. 此外, 对近壁网格节点应用壁函数方法^[10]来处理近壁黏性层次.

(5) 自由面边界. 对自由面的处理采用 VOF 方法, 其基本概念是对每一个单元体定义流体体积函数 $F(x, y, t)$, 当单元体充满流体时单元体的体积函数值定义为 1; 当单元体为空时单元体的体积函数值定义为 0; 自由表面单元体的定义为体积函数值大于 0 且至少有一个与它相邻的单元体为空单元. 这样对每个单元体只要一个体积函数的信息就可以构成流体区域. 在每一个时间步上根据体积函数的值重构自由面, 自由面单元上的 u, v 在满足连续方程的前提下作一定的调整, p, C, k, ϵ 等用向外插值的方法求得.

2.3 离散方法、计算区域和网格划分

采用有限差分并结合交错网格的方法对除体积函数以外的控制方程进行离散, 对于对流项的离散在计算网格内点采用三阶迎风差分格式, 在边界点处采用一阶迎风格式和二阶中心格式线性组合的偏心差分格式, 对黏性项采用中心差分格式, 压力叠代格式从连续方程推出. 由于体积函数是阶梯函数, 不能采用普通的差分格式, 而是采用施主-受主单元模

型^[11].

确定垂向计算区域要考虑自由面的升高,至少要比升高后的水面高出一个网格;在横向当射流量比较大时,为了避免涌起的表面波反射对计算值的影响,计算域要取得足够长,即下游要大于 $(\sqrt{gH}+u_{in})T$,上游要大于 $(\sqrt{gH}-u_{in})T$,其中 T 为要计算的时间,这个长度能够满足下游边界的充分发展条件,当射流量远远小于来流量时不会有向远处传播的表面波,这样下游有8倍水深、上游有3倍水深左右的计算长度就可满足边界的充分发展条件.网格步长可变,考虑到横向计算区域比较长,而且喷口附近又要求网格比较密,所以从喷口两侧起用等比数列的方法向两边由密变疏,喷口的步长最小,占3~9个均匀网格,依喷口宽度而定.

3 模型的数值计算及结果讨论

为了对恒定横流下底部排放的流动特性有一个全面了解,本文作了系统的数值试验,对 $R=v_{jet}/u_{in}$ 在0.4~25.00, B/H 在0.03~0.15的各种情况进行了计算,并且将结果与前人模拟结果、试验结果进行了对比.回流区、速度场、浓度场是否准确是衡量此模型的关键.

3.1 回流区

射流和横流相互作用,在下游形成回流区,如图2所示,回流区的长度 L_r 和高度 H_r 与动量比 $M=R^2(B/H)$ 有关.一般认为 H_r/L_r 是与 M 无关的定值,用标准 $k-\epsilon$ 模型算出的 H_r/L_r 值一般比试验测得的值偏大,比如赵明登和郑邦民^[8]得到0.195,杨志峰^[7]得到0.2,而Mikhail等^[12]在试验中测得大约为0.12,本文经过大范围计算得到的值为0.11~0.14,与Wang和Cheng^[13]用RNG $k-\epsilon$ 模型计算侧边排放形成的回流区的值相当,如图3所示.为了具体分析速度比(R)和宽深比(B/H)对 H_r 和 L_r 的贡献,将数值试验得到的数据拟合成 $y=A_1 \ln R + A_2 \times \ln(B/H) + A_3$,结果如图4和5所示,从拟合结果看出 R 的作用比 B/H 的作用大,尤其是对于 H_r ,射流宽度影响甚微,这与Mikhail等的试验结论相符.

3.2 速度场

图6是同样的射流参数、不同的横流速度情况的对比,可以看出整个水面有所抬升,由于射流对横流的阻碍,上游水面抬升较下游高,与回流区相对应的区域水面相对较低.槐文信等用试验确定 $M=$

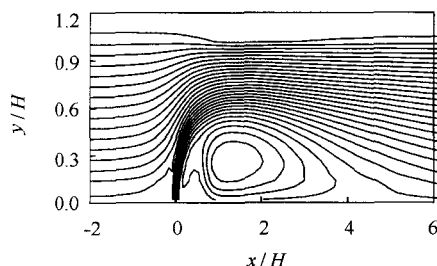


图2 回流区

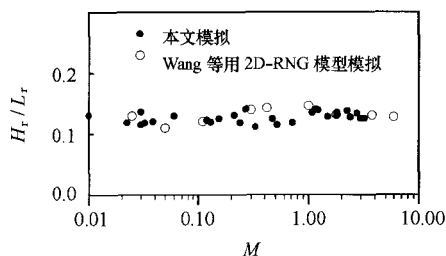


图3 H_r/L_r 与 M 的关系

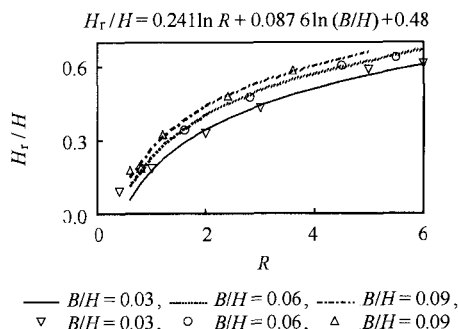


图4 回流区高度与 R 和 B/H 的关系

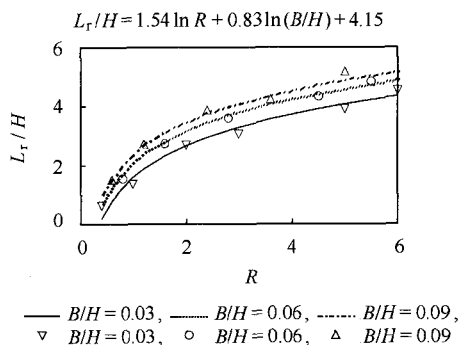


图5 回流区长度与 R 和 B/H 的关系

7.34 为临界状态,当 $M \leq 7.34$ 时射流在水面的垂直动量为0,与喷口对应的水面处不再有隆起,迎流面不再形成回流,本文的结果与试验吻合得相当好.为了了解速度的变化趋势,在图7中对比了喷射口

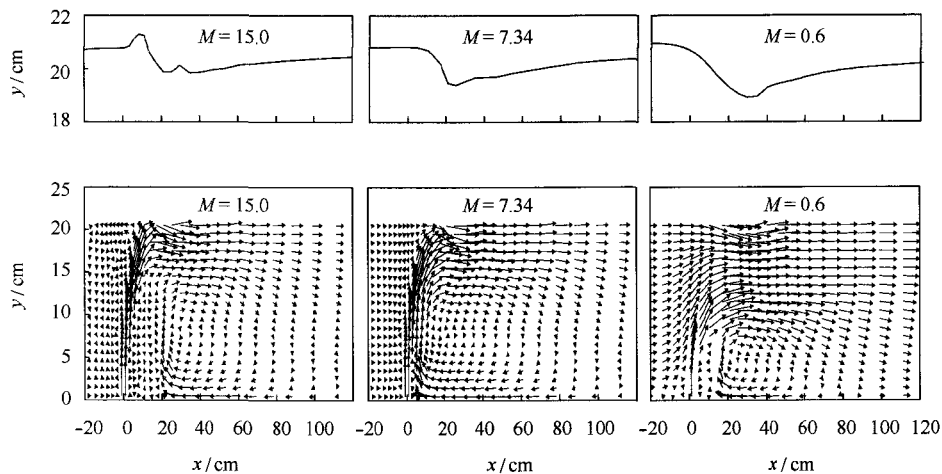


图6 近区速度矢量场和其对应的自由面

不同距离处速度 u 的垂向变化, 可以看到最大速度的位置随 x/B 的增大上移. 将 u 最大点的连线作为射流轨迹线, 考虑 R 和 x/B 两个因素, 拟合成表达式 $y/B = 1.75R^{0.39}(x/B)^{0.42}$, 并与其他研究者的结果比较, 如图8所示, 可以看出本文计算值及拟合表达式与试验结果吻合得比较好. 不同研究者对射流轨迹线给出的表达式不尽相同, 这与他们的研究方

法不同有关, 也与他们对射流轨迹线的定义不同有关, 有的研究者将示踪质内外边界的中线作为射流轨迹线, 有的将速度 u 或者浓度 C 的最大值的连线作为射流轨迹线; 本文得到用浓度最大值连线拟合出的表达式 $y/B = 1.146R^{0.46}(x/B)^{0.54}$, 图9给出用浓度与用速度确定的轨迹线的对比. 浓度轨迹线与速度轨迹线基本重合, 近区稍偏低, 远区稍偏高.

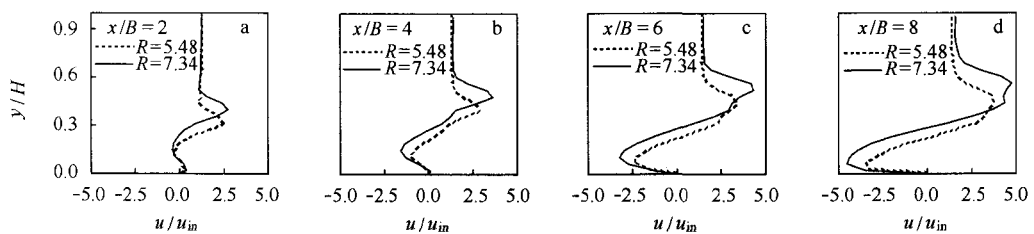


图7 距喷嘴不同距离处水平速度对比

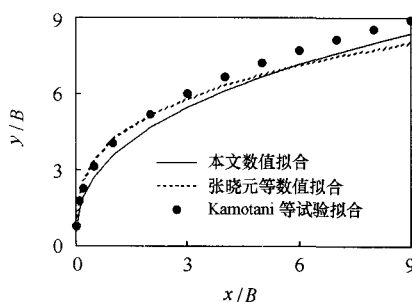


图8 由速度确定的射流轨迹线

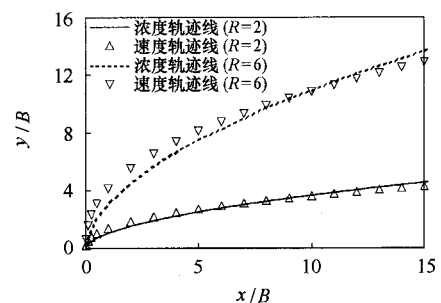


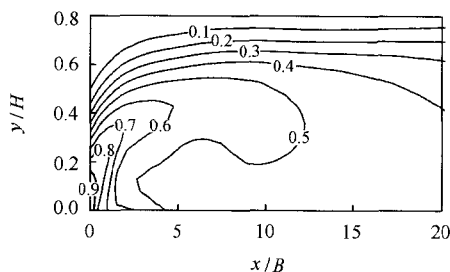
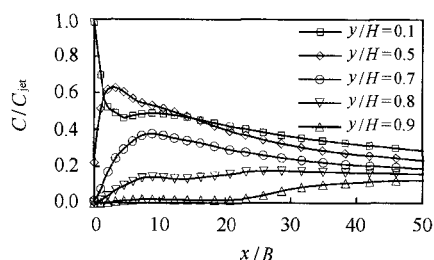
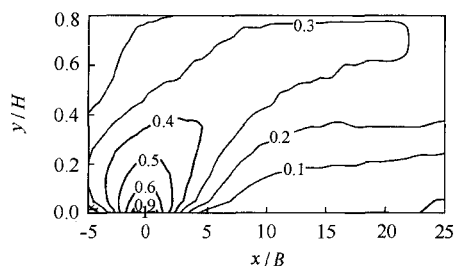
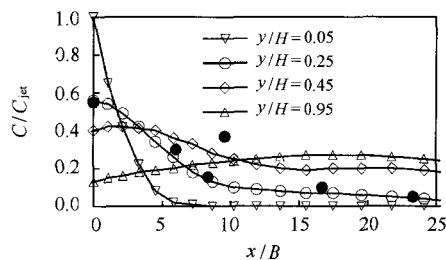
图9 由速度和浓度确定的射流轨迹线的对比

3.3 浓度场

图10和12分别为 $R=2.0$ 和 24.8 时的浓度等

值线, 从图中可以很清晰地看出浓度轨迹线. 图11和13分别为 $R=2.0$ 和 24.8 时不同深度的浓度在

x 方向的衰减情况. 图 13 通过与黄真理等的试验数据的比较, 证明了浓度场计算的正确性. 对比图 11 和 13 可以发现: 当 R 比较小时靠近水面以外的其他地方的浓度迅速达到峰值后又很快向平均浓度衰减; 靠近水面处近区浓度较小, 基本不受污染, 进入顺流贯穿段后浓度增大. 离开喷口一定距离后浓度趋于均匀, 但依然是从水面向水底递增, 水面污染较小; 当 R 比较大时水底浓度迅速衰减, 水面浓度平稳增加, 离开喷口一定距离后浓度从水面向水底递减, 水面污染严重.

图 10 $R=2.0$ 的浓度等值线图 11 $R=2.0$ 的不同深度的浓度在 x 方向的衰减图 12 $R=24.8$ 的浓度等值线图 13 $R=24.8$ 的不同深度的浓度在 x 方向的衰减

4 结语

本文利用 $k-\epsilon$ 紊流模型, 结合 VOF 方法建立数学模型, 模拟了横流底部排污的问题, 并且将模型的数值结果与试验结果进行了比较. 回流区的形状与 R 及 x/B 的关系表明, 用 VOF 方法考虑自由面算得的 L_r/H_r 比用刚盖假定或弹性刚盖假定更接近试验结果. 得到了用速度和浓度确定的射流轨迹线, 与试验结果比较吻合, 得到了合理的速度场和浓度场.

参考文献:

- [1] ANDREOPOULOS J, RODI W. Experimental investigation of jets in a cross-flow[J]. J Fluid Mech, 1984, 138: 93—127.
- [2] ANDREOPOULOS J. On the structure of jets in a cross-flow[J]. J Fluid Mech, 1985, 157: 163—197.
- [3] CHEN K S, HWANG J Y. Experimental study on the mixing of one- and dual-line heated jets with a cold cross-flow in a confined channel [J]. AIAA Journal, 1991, 29(3): 353—360.
- [4] 黄真理, 李玉梁, 余常昭. 平面激光诱导荧光技术测量横流中射流浓度场的研究[J]. 水利学报, 1994, (11): 1—7.
- [5] 槐文信, 李 炜, 彭文启. 横流中单圆孔紊动射流计算与特性分析[J]. 水利学报, 1998, (4): 7—14.
- [6] 张晓元, 李 炜, 李长城. 横流环境中射流的数值研究[J]. 水利学报. 2002, (3): 32—38.
- [7] 杨志峰. 潮汐流动中垂向排放近区数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 1989.
- [8] 赵明登, 郑邦民. 横流中底部排污混合区的分析计算[J]. 武汉水利水电大学学报, 1995, 28(2): 149—155.
- [9] 梁书秀, 沈永明, 孙昭晨, 等. 潮汐水域中污水侧向排放的数值模拟[J]. 海洋学报, 2000, 22(2): 113—119.
- [10] CHEN C J, JAW S Y. Fundamentals of turbulence modeling[M]. Washington D C: Taylor & Francis, 1998.
- [11] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201—225.
- [12] MIKHAIL R, CHU V H, SAVAGE S B. The reattachment of a two-dimensional turbulent jet in a confined cross flow[A]. Proceedings of the 16th IAHR Congress, Vol. 3[C]. Brazil: Sao Paulo, 1975.
- [13] WANG X, CHENG L. Three-dimensional simulation of a side discharge into a cross channel flow[J]. Computers & Fluids, 2000, 29: 415—433.

- [14] 槐文信,李爱华,那宇彤,等. 流动环境中三维铅垂纯射流的试验研究[J]. 水科学进展,2003,14(3):300—304.

Simulation on a slit-type turbulent jet in a cross-flow using the VOF method

YUAN Li-rong¹, SHEN Yong-ming¹, ZHENG Yong-hong²

- (1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
2. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China*)

Abstract: A two-dimensional bottom jet discharged into a cross-flow is simulated by the standard two-equation $k-\epsilon$ model with VOF method. By comparing with experimental results, it is shown that the recirculation zones calculated using the model generally agree with the experimental results. Velocity and concentration's trajectories are expressed by simple formulas and compared with experimental results. Some conclusions are also draw by analyzing the velocity and concentration distributions.

Key words: slit-type; turbulent jet; cross-flow; VOF method; concentration