

静水中正方形孔口的有障碍浮射流() 流场特性分析

槐文信¹, 方神光², 戴会超¹

(1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室 武汉大学, 武汉 430072;

2. 清华大学 水利系, 北京 100084)

(刘宇陆推荐)

摘要: 在数值计算成果的基础上, 对正方形阻力盘浮力射流的流场进行了分析和总结, 基于轴线流速的变化规律将盘后流场分为 3 个区域: 回流区、过渡区和自相似区。验证了竖直方向流速自相似性的存在。根据给出的轴线流速的变化图也可以区分盘后 3 个区域的位置, 同时发现各工况在自相似区域的轴线流速沿同一规律曲线变化, 采用 Chen 和 Rodi 对流速的表示方法, 得到了所有工况下自相似区域轴线流速的分布公式。给出了典型工况下阻力盘后不同高度位置处的压强场等值线变化过程, 发现盘后各负压中心区域的产生、膨胀、破裂和消失。

关键词: 浮力射流; 区域划分; 流速场; 压强场; 轴线流速

中图分类号: O358 **文献标识码:** A

引 言

文献[1]通过数值模拟和试验给出了正方形孔口阻力浮射流的温度场分布和轴线稀释度, 发现其分布规律和形状与 Noutsopoulos 和 Yannopoulos^[2]以及槐文信和方神光^[3,4]得到的圆孔有阻力浮射流在自相似区域的分布规律和形状基本一致, 由此可以得出采用正方形阻力盘的正方形孔口浮射流同样也能改善射流近区的稀释度, 达到保护环境的目的。为全面了解此类流场在射流近区的流动状况, 本文将给出数值模拟计算得到的流速场。

从方神光和槐文信^[4]对圆孔有阻力浮射流流速场的研究与分析可以看到, 与无阻力圆孔射流相比, 由于阻力盘的存在, 使射流流体在绕过阻力盘的过程中流场各要素发生急剧变化, 整个流动较为复杂, 在数值模拟该类流动时仍然可以采用二维的圆柱坐标系下的 RNG 紊流模型, 而对正方形孔口有阻力浮射流, 则是完全的三维流动, 其射流流场结构更为复杂, 由于试验条件和设备所限, 没有给出相应的流速场, 同时也缺乏相关的试验资料来进行对比验证, 但从文献[1]通过数值模拟计算得到的有关温度场的大小和分布与试验资料的良好吻合可以看出, 三维的 RNG 紊流模型能有效的模拟流场中温度场的变化, 鉴于温度场和流速场以及压力场相互间的耦合关系, 说明得到的相应的流速场和压力场能反应实际流动的特征, 因此本文主要给

收稿日期: 2005_03_14; 修订日期: 2005_12_18

基金项目: 教育部优秀教师资助计划资助项目(2003_99)

作者简介: 槐文信(1963), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士(联系人, Tel: + 86_27_68772211; Fax: + 86_27_68772310; E_mail: wxhuai@whu.edu.cn)

出数值计算得到的该类流动的特性

1 流场区域的划分

基于对大量工况的数值模拟得到的流速场, 可以对该类型流动区域进行划分, 以便首先对此类流动有一整体的印象和轮廓。图 1 给出了工况为 $H/L = 1, L/l = 6, F_0 = 8.52$ 时的三维流动全貌, 绘出了从喷口喷出的流体绕过阻力盘(第一个横截面位置处)的流线, 同时给出 4 个不同高度位置横截面上温度等值线分布的大致轮廓。图中看到流线在绕过阻力盘后都向轴线处靠拢, 紧靠盘后的区域存在回流, 流线在此处弯曲回转, 且分布密集, 显示此处流动要素变化剧烈, 经过该位置之后, 流线又重新变为顺直延伸向远处。同时从各横截面上的温度等值线分布可以再次看到温度场在绕过阻力盘后的变化过程, 即从星形逐渐变为圆形。图 2 绘出的是法线为 z 轴并通过射流轴线立面上(x, O, y) 的流线和温度场分布图, 可以将整个射流区域分为 4 个区: 撞击区, 回流区, 过渡区和自相似区, 撞击区域位置为射流绕过阻力盘之前的区域, 阻力盘之后一段区域出现回流, 对应的轴线处的流速为负值(相对于 y 轴的正方向而言); 回流区之后的一段区域是过渡区, 此时轴线处的流速逐渐增大, 在此区域之后, 各横截面上的流速分布和温度分布具有自相似性, 并且与圆孔浮射流的横截面上的分布形态相同, 此区域即为自相似区。

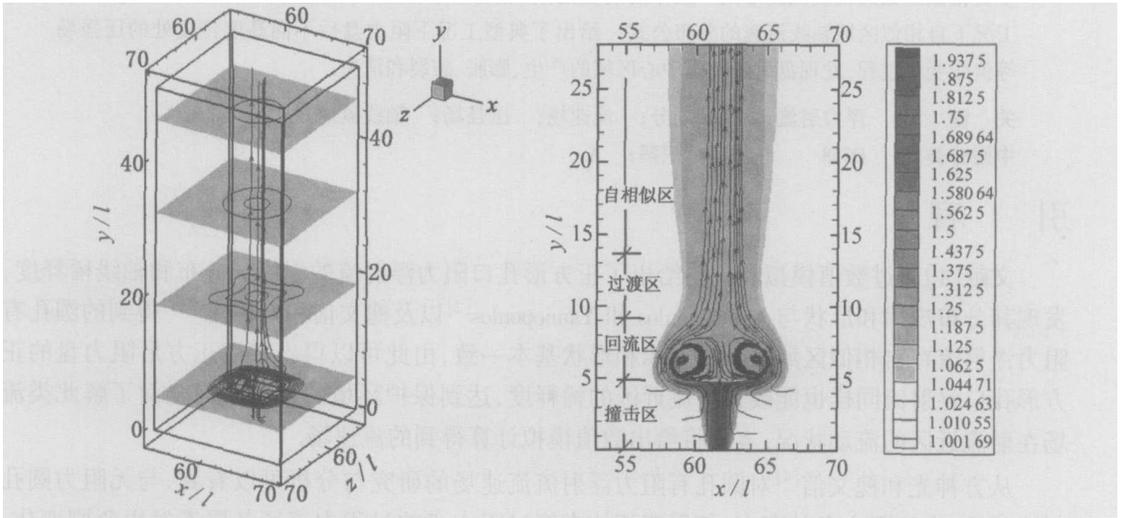


图 1 三维流动图 ($H/L = 1,$
 $L/l = 6, F_0 = 8.52$)

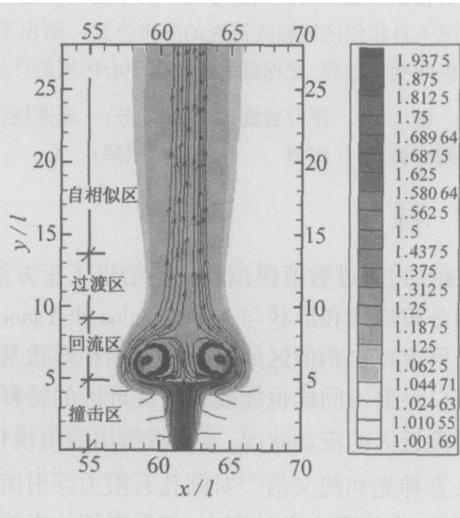


图 2 阻力射流各流态区域划分示意图

2 流速场分布

2.1 横断面流速分布

图 3 是一典型工况为 $H/L = 1, L/l = 4, F_0 = 8.52$ 时阻力盘后不同位置高度上流速 v 的等值线分布, 从该图可以看到, 在离盘很近的位置处 ($y/l = 5.35$), 轴线上的流速为负值, 即阻力盘后的回流区, 以轴线为中心的周围区域流速 v 都很小, 在分别与正方形阻力盘相对应的四个角的位置方向分别出现了一个流速 v 较大的中心区域, 与各面上的温度等值线变化一致, 在经过一段距离后, 由于轴线处负压的吸附作用, 周围流体向轴线靠拢, 出现如同位置 $y/l = 12.6$ 处的等值线分布, 形成该星形主要是由于受到轴线负压吸附强度不同造成的, 随着离出口

距离增加,其分布为与圆孔浮射流横截面上的流速 v 分布一样,为一以轴线为中心的同心圆分布,轴线处的流速 v 值最大,向外依次减小

2.2 自相似区流速分布

图4给出了几个典型工况 ($H/L = 1, L/l = 4, F_0 = 8.52$ 和 $H/L = 4, L/l = 2, F_0 = 17.0$) 自相似区域各横断面上流速 v 的分布曲线,同样可以看到正方形阻力盘后流速 v 自相似性的存在。在图3中已经证实自相似区域的流速 v 的分布是以轴线为中心的同心圆形状,因此图4中的 v 在 x 方向上的分布形状代表了各横截面上不同方向上的分布形状。不同工况的流速影响范围要比温度的影响范围稍微大一些,但也基本上分布在 $-0.2 \leq x/y \leq 0.2$ 区域内

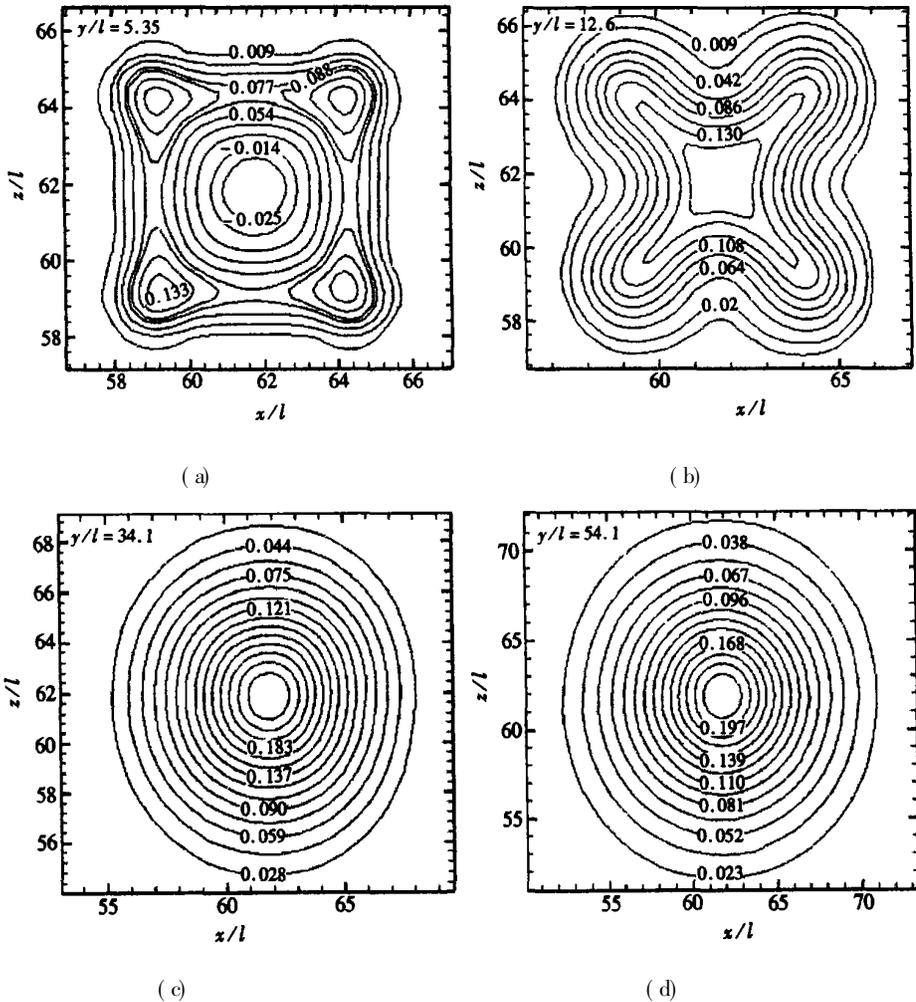


图3 工况 $H/L = 1, L/l = 4, F_0 = 8.52$ 时不同位置高度上流速 v 的等值线分布

2.3 轴线流速分布

图5给出了一典型工况 $L/l = 2$ 时,在不同高度位置 H/L 和弗汝德数 F_0 条件下阻力盘之后区域轴线上流速 v 的分布曲线。从该图中可以看到阻力盘之后的3个区域,流速 v 为负值的即回流区,流速 v 从0变化到最大时一段区域即过渡区,过渡区之后即自相似区。盘后轴线上流速 v 所能达到的最大正值和最大负值随阻力盘离孔口的距离变化不大,但出口弗汝德数的影响则较大,这两个值均随傅氏数的增加而减小。采用 Chen 和 Rodi^[5] 提出的无量纲参考量

来整理所有工况下自相似区域的轴线流速,即以 $Y = (y/l)F_0^{-1}$ 为横坐标, $V = (v_m/v_j)F_0$ 为纵坐标(LI 和 HUAI^[6]),将结果表示于图 6 中,图中也给出了 Noutsopoulos 和 Yannopoulos^[7]的自由浮射流自相似区轴线流速经验公式 可以看到所有数据点都位于一拟合直线附近,则有阻力盘自相似区域轴线上流速 v_m 的拟合公式为

$$\frac{v_m}{v_j} F_0 = 2.93 Y^{0.28}, \quad (1)$$

公式(1)中 v_j 为射流出口流速 该自相似区域轴线处流速 v 之所以能沿同一变化规律曲线,是因为射流在绕过阻力盘后动量的作用已经被极大的削弱甚至消失,流体质点主要是在浮力作用下向上运动 从图 6 还可以看到,轴线上的流速都要小于无阻力时轴线上的流速值,也主要是由于射流受到阻力盘阻挡后动量损失很大的缘故 图中 Noutsopoulos 和 Yannopoulos^[7]给出公式中的 K_w 的表达式为

$$K_w = 0.12 - 0.02 \exp(-0.05 Y^2) \quad (2)$$

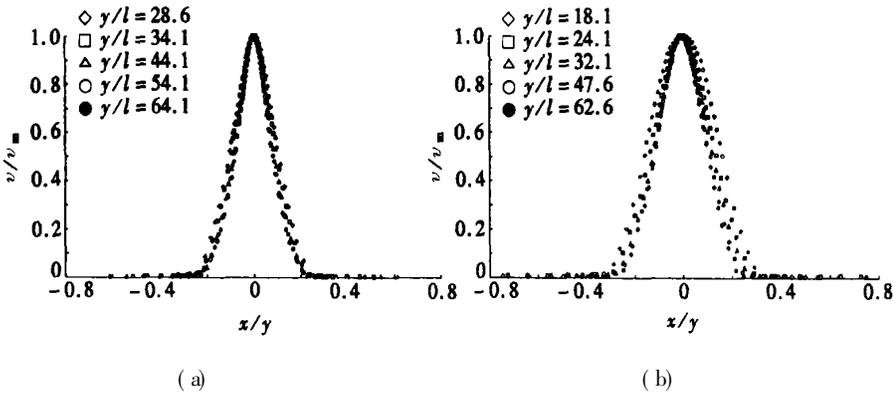


图 4 不同典型工况下阻力盘后自相似区域各高度位置流速 v 分布图

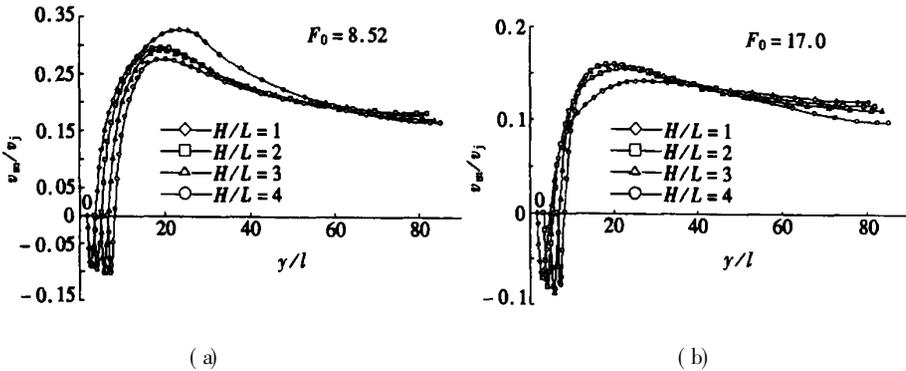


图 5 $L/l = 2$ 时阻力盘以上轴线处流速 v 分布图

3 压强场分析

为了对射流绕过阻力盘后的流动形态有一更深刻了解,以工况 $H/L = 1, L/l = 2, F_0 = 8.52$ 为例来分析压强场的变化,图 7 给出阻力盘后不同高度位置处的压力场等值线分布变化图 图中显示在紧邻阻力盘后的区域($y/l = 2.4$, 此工况阻力盘离孔口距离为 $H/l = 2$)形成的负压较其他高度位置处的负压要大的多;同时图中显示最大负压出现的位置都不在轴线上 在离盘较近的区域($y/l = 3.8$),由于阻力盘的影响,正方形 4 个边长中心处的射流流体

先于其他位置的射流流体绕过阻力盘, 因此在对应各边长中心位置处分别形成一个较小的负压中心; 离阻力盘的距离继续增加 ($y/l = 5.06$), 则阻力盘 4 个尖角对绕流流体的影响凸显出来, 分别在四个角对应的位置形成一个较大的负压中心, 而先前在对应各边中心位置处的负压中心由于高度的增加而迅速消失了; 随着高度增加 ($y/l = 6.3$), 对应尖角位置处的 4 个负压中心区域的面积不断膨胀, 图中可以看到各负压区域的边界已经相互连接在一起; 高度达到 $y/l = 9.75$ 后, 这 4 个不断膨胀的负压区域由于相互吸附影响而破裂成 8 个小的负压中心; 高度距离继续增加 ($y/l = 16.6$), 可以想象这些小的负压中心也会随着射流不断的掺混而消失。实际上, 由于负

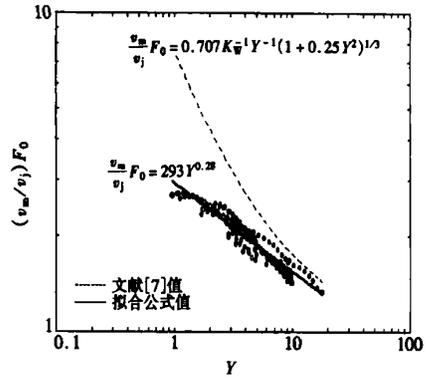
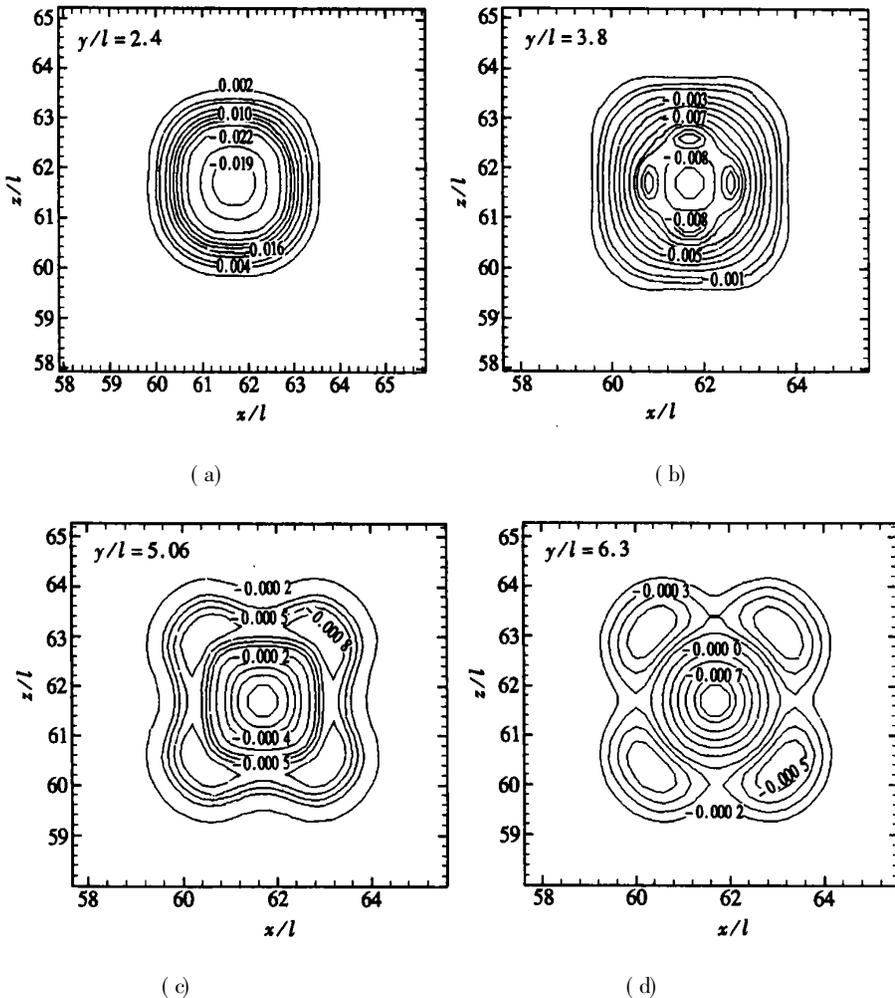


图 6 自相似区域流速 v 沿轴线的分布



压区域与漩涡区域的对应关系, 这些负压区域的形成、膨胀、破裂和消失也反映了阻力盘后所形成主要漩涡的一系列发展过程

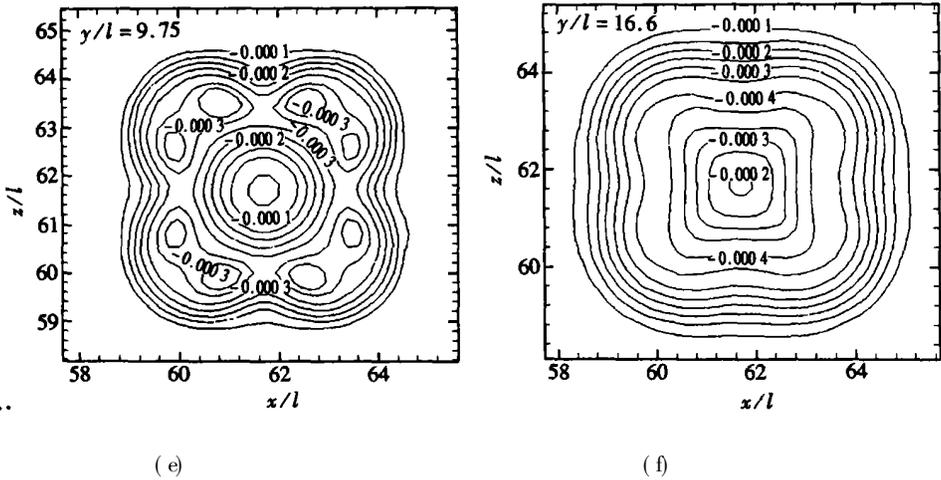


图7 $H/L = 1, L/l = 2, F_0 = 8.52$ 时阻力盘后不同高度位置处压强场等值线分布图

4 结 论

基于大量的数值模拟计算, 可以将整个流场近区划分为4个区域: 撞击区、回流区、过渡区和自相似区。给出了典型工况不同高度位置处竖直方向流速的等值线分布变化图, 发现在到达自相似区域后其分布形状仍然是以轴线为中心的同心圆分布, 并验证了其自相似性的存在。通过给出的轴线流速的变化图可以清晰地区分所划分的4个区域的位置, 采用 Chen 和 Rodi^[5] 提出的无量纲量, 得到了自相似区域轴线流速的分布公式。给出了典型工况下阻力盘后不同高度位置处的压强场等值线变化过程, 发现盘后各负压中心区域的产生、膨胀、破裂和消失, 它与盘后的漩涡变化是相对应的。

[参 考 文 献]

- [1] 槐文信, 方神光, 戴会超. 静水中正方形孔口的有障碍浮射流() 数学模型及计算方法的验证[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(5): 571-578.
- [2] Noutsopoulos G C, Yannopoulos P C. Axial dilution in obstructed round buoyant jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(1): 71-81.
- [3] 槐文信, 方神光. 静止环境中阻力圆盘浮力射流特性的研究() 数学模型及计算方法的验证[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 549-554.
- [4] 方神光, 槐文信. 静止环境中阻力圆盘浮力射流特性的研究() 流场特性分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 555-560.
- [5] Chen C J, Rodi W. A Review of Experimental Data of Vertical Turbulent Buoyant Jets [M]. Oxford: Pergamon Press, 1978, 19-20.
- [6] LI Wei, HUAI Wen_xin. Calculation of whole field for vertical round buoyant jet in stratified environment [J]. Journal Hydraulic Research, 1995, 33(6): 865-876.
- [7] Noutsopoulos G C, Yannopoulos P C. The round vertical turbulent buoyant jet [J]. Journal Hydraulic Research, 1987, 25(4): 481-502.

Behavior of Obstructed Square Buoyant Vertical Jets in Static Ambient() Analysis on the Behavior of Flow Field

HUAI Wen_xin¹, FANG Shen_guang², DAI Hui_chao¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China ;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: Based on a series of numerical calculations, the behavior of flow field in obstructed square buoyant vertical jet is summarized and analyzed. Based on the axial line velocity distribution, the flow after the disc can be divided into three regions: i. e. recirculation region, transitional region and self-similar region. The characteristic of self-similarity of upright velocity was validated. The three regions can also be distinguished based on the axial velocity. The axial velocity in self-similar region was found to obey the same law and the formula was presented by introducing the velocity expression used by Chen and Rodi. The isolines of pressure on cross sections of different heights were displayed and the production, expansion, breaking and disappearing of negative pressure regions were found.

Key words: buoyant jets; divided regions; velocity field; pressure field; axial velocity