

Режимы распространения плоской воздушной струи в прямоугольной полости**Научный руководитель – Засимова Марина Александровна***Кудрявцева В.В.¹, Засимова М.А.²*

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербург, Россия, *E-mail: vasilisa.kudryavtseva1997@gmail.com*;

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербург, Россия, *E-mail: zasimova_ma@mail.ru*

Доклад посвящен численному моделированию истечения воздушной струи из плоского щелевого сопла в ограниченную область - прямоугольную полость, одна из границ которой открыта. Постановка задачи приближена к условиям эксперимента [1]. В статье [1] показано, что в зависимости от расположения приточного отверстия в полости может сформироваться или стационарный режим распространения струи без колебаний, или нестационарный режим с периодическими или нерегулярными колебаниями.

Численное моделирование турбулентного течения воздуха выполнено в двумерной постановке в приближении несжимаемой среды с постоянными физическими свойствами: кинематический коэффициент вязкости $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Полость имеет ширину 0.5 м и высоту 0.2 м, расположение сопла, через которое воздух поступает в полость, варьировалось. Рассмотрены три варианта расположения сопла в полости. Два положения, согласно [1], соответствуют стационарному режиму истечения струи, когда приточное отверстие расположено вблизи торцевой стенки, на расстоянии $X_0 = 0.1 \text{ м}$ от нее, на высоте $H_0 = 0.085 \text{ м}$ от нижней стенки полости (вариант №1, рис. 1а) и вдали от торцевой стенки на расстоянии $X_0 = 0.4 \text{ м}$, $H_0 = 0.04 \text{ м}$ (вариант №2, рис. 1б). Третье положение соответствует нестационарному режиму, когда сопло расположено вблизи открытой границы посередине полости при $X_0 = 0.4 \text{ м}$, $H_0 = 0.1 \text{ м}$ (вариант №3, рис. 1в-д).

На входной границе (приточное отверстие) высотой $h_0 = 0.01 \text{ м}$ в качестве граничного условия задана среднерасходная скорость $U_0 = 6 \text{ м/с}$, на выходной открытой границе задавались мягкие граничные условия (постоянный уровень давления). Определяющим параметром задачи является число Рейнольдса $Re = U_0 h_0 / \nu = 4000$.

Моделирование течения проведено на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS/URANS подход), замкнутых различными полуэмпирическими моделями турбулентности: стандартной $k-\epsilon$, $k-\epsilon$ RNG, $k-\omega$ SST, Spalart-Allmaras. Использовались квазиструктурированные сетки, построенные в пакете ICEM CFD, размерностью: от 9 до 372 тысяч ячеек для варианта №1, от 6 до 26 тысяч ячеек для варианта №2 и 10 тысяч ячеек для варианта №3. Безразмерное расстояние от центра первой пристенной ячейки до стенки в среднем составило 0.2. Расчеты проводились с помощью пакета ANSYS Fluent с использованием опций, обеспечивающих второй порядок аппроксимации.

Сеточная независимость получаемого решения была показана для вариантов №1 и №2. При увеличении размерности сетки в варианте №1 наибольшие отличия в соответствующих решениях наблюдаются в области медленного течения над соплом (рис. 1а), в нижней области полости, под соплом, изменение размерности сетки слабо влияет на структуру течения. Сеточная независимость решения для варианта №1 достигается на сетке размерностью 30 тысяч ячеек. В варианте №2 при использовании сеток разной размерности отличия в решениях наблюдаются в основном вблизи локальных максимумов скорости, был сделан вывод, что решения, полученные с использованием расчетных сеток размерностью 6 тысяч и более, являются сеточно независимыми.

Исследование влияния модели турбулентности на получаемое решение проводилось для вариантов №1 и №2. Все модели турбулентности, за исключением $k-\omega$ SST, предсказывают схожие между собой результаты по полям скорости. Использование модели $k-\omega$ SST приводит к несколько отличающемуся решению. Для дальнейших расчетов в качестве базовой выбрана стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности.

В результате расчетов для варианта №1 получен стационарный режим течения, при этом получаемая картина течения (рис. 1а) качественно согласуется с наблюдаемой в эксперименте [1]. Струя распространяется до торцевой стенки и разворачивается вблизи нижней стенки (расположенной ближе к соплу), после разворота движется вдоль стенки к выходной границе. В области над соплом формируется вторичное низкоскоростное течение, локальные максимумы скорости наблюдаются вблизи торцевой стенки полости над приточным отверстием и составляют около 1.3 м/с, ближе к выходной границе полости формируется застойная область - значения скорости не превышают 0.01 м/с.

Для варианта №2 в расчетах получено стационарное течение (рис. 1б), качественно и количественно схожее с экспериментальными данными по профилям скорости [1]. Струя после истечения из сопла распространяется вдоль нижней стенки полости (рис. 1б), затем разворачивается и движется вдоль торцевой стенки полости, после чего, двигаясь вдоль верхней стенки полости, покидает полость через выходную границу. Следует отметить сильную чувствительность решения для варианта расположения сопла №2 к выбору выходного граничного условия, а также к начальному полю; варьируя эти параметры, можно получить принципиально иное устойчивое стационарное решение, отличное от регистрировавшегося в эксперименте.

В случае нестационарного режима (вариант №3) получена структура течения с периодическими колебаниями струи. На рис. 1в-д показаны поля скорости течения в характерные моменты времени t за один период колебаний T : струя расположена вблизи верхней стенки полости (рис. 1в), струя расположена посередине полости (рис. 1г), струя расположена вблизи нижней стенки полости (рис. 1д). Полученный в расчете период колебаний 1.16 с качественно согласуется с экспериментальным 1.47 с, в зависимости от расположения точки мониторинга отличия в амплитуде колебаний, полученные по данным расчета и эксперимента, оказались в диапазоне 13...31%.

Исследование проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-58-18013.

Источники и литература

- 1) Mataoui, K., Schiestel, R., Salem, A. Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling. // Flow, Turbulence and Combustion. 2001, №67. pp. 267–304.

Иллюстрации

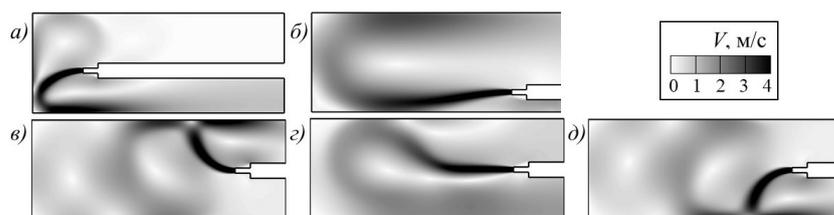


Рис. 1. Поля модуля скорости для вариантов а) №1, б) №2 и для варианта №3 в моменты времени: в) $t = 0$, г) $t = 0.27 T$, д) $t = 0.5 T$