Числено и интегрално изследване на температурно и скоростни полета при взаимодействие на струи в плосък канал

Ангел Терзиев, Иван Антонов, Росица Величкова

Numerical and integral study of the temperature and velocity fields as a result of the interaction of jets in a flat non-thermally insulated duct: *The paper presents the numerical study of the temperature and velocity fields, resulting from the interaction of two jets in a flat non-thermally insulated duct. The results were compared with the obtained by the means of integral methods. A brief description of the mathematical model is presented - equations for distribution of a jets, and heat transport equations. Obtained profiles for velocity and temperature distribution for the initial and general sections of the jets by the two methods are compared and analyzed.*

Key words: *Jet mixing in a flat duct, Temperature and Velocity profiles; CFD study; Integral study.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Струите в ограничено пространство са широко разпространени в инженерната практика – от системите за впръскване на гориво, през хидроусилвателите до системите за кондициониране на въздуха. В болшинството от случаите режимите на движение на такива струйни течения са турбулентни.

Разликата между струите в ограничено и неограничено пространство се състои основно в отчитане на взаимодействието между струята и твърдата повърхност при първия вид. Ограничението на разпространението на струята от плосък канал оказва влияние не само върху разпределението на скоростното поле, но и върху пулсационната структура на потока. Последната оказва влияние не само върху динамиката на течението, но и върху процесите на топло- и масообмен.

Едни от първите опити за изследване на скоростното поле на струя в плосък канал по интегрален метод принадлежи на [9]. Моделът е силно опростен като се пренебрегва влиянието на пристенния граничен слой. В годините, интегралният метод за решение се е развивал и се използва при решението на най-разнообразни двумерни и тримерни струйни задачи. Най-съвременната форма на този метод са интегралните съотношения [8],[11]. Същността на този метод се състои в разделяне на потока на надлъжни слоеве и апроксмиация на съответстващите търсени слоеве в напречно направление прости функции. Свободните параметри на тези функции се определят от системите за интегрални съотношения.

При изследването на един такъв тип течения, несъмнено моделирането на турбулентността е от съществено значение. В най-общия случай при моделирането на турбулентността се използват уравненията на Рейнолдс.

С най-голямо приложение в практиката са разработените класически турбулентни модели за канални струйни течения от [2],[3].

По отношение на двупараметричните модели за моделиране на турбулентността може да бъде посочен $k-L$ [7]. При този модел турбулентните характеристики се изразяват чрез турбулентната кинетична енергия и мащаба на турбулентност (L). Друг подобен двупараметричен модел, придобил популярност през последните години е $k-\varepsilon$ модел, в който изменението на турбулентната кинетична енергия е функция на скоростта на дисипация. В работите [6] и [12] е правен опит за моделиране на канални струйни течения при използване на $k-\varepsilon$ модел на турбулентност.

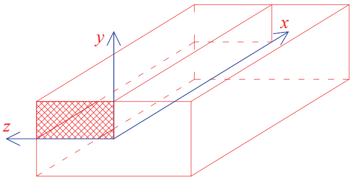
Съществуват и други двупараметрични модели за моделиране на турбулентност, като например $k-\omega$ модела [12].

От трипараметричните могат да бъдат посочени $k_g-k_p-\varepsilon$ [4], [10] и $k-\omega-v^2$.

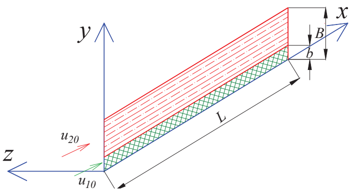
ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Основната цел на настоящата работа е числено изследване на скоростното и температурно поле при разпространение на струя в плосък, нетоплоизолиран канал и сравнението на резултатите с такива получени при интегрално решение на задачата.

На фиг. 1 е представена геометрията на изследвания плосък канал. Поради симетрията, при решението на задачата се изследва ¼ от разглеждания канал. Координатната система е ориентирана по следния начин: "x" - ос по направление на основното течение $(x \geq 0)$; y - в напречно направление $(0 \leq y \leq B)$, където B е полуширочината на канала (фиг.2).



Фиг.1. Изглед на плоския канал



Фиг.2. Полуширина на канала с обозначение на основните геометрични размери

В центъра на канала протича основна струя с параметри, u_1, T_1, а в пространството между първата струя и каналната стена – втора струя с параметри u_2 и T_2. Приема се, че $u_1 \neq u_2$ и $T_1 \neq T_2$. В процеса на разпространение по дължина на канала, двете струи се смесват, в резултат на което се формират нови скоростни и температурни полета (зони). Заедно с процеса на разпространение и развитие на комплексното струйно течение, допълнително е разгледан и случай на топлообмен с околната среда (канала се приема за нетоплоизолиран), което допълнително усложнява задачата и влияе върху двата профила – скоростния и температурния.

Тук е необходимо да се направи следното приемане – поради голямата разлика в размерите на канала, надлъжната скоростна компонента е много по-голяма от напречната $(u >> v)$. По тази причина е в сила и следната зависимост $\partial u / \partial x << \partial u / \partial y$. За разпределението на температурата може да бъде записана аналогична зависимост $\partial T / \partial x << \partial T / \partial y$.

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ. НАЧАЛНИ И ГРАНИЧНИ УСЛОВИЯ.

Съгласно [1] в правоъгълни координати, уравнения за турбулентния топлопренос в граничния слой на свиваем флуид имат вида:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho \overline{u'v'}\right) \qquad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial i}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho \overline{i'v'}\right) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_*) = 0, \qquad (3)$$

където: u, v - усреднени скорости по съответните направления, $[m/s]$; p - осреднено налягане, $[Pa]$; ρ - средна плътност на газа в канала, $[kg/m^3]$; $i = c_p t$ -

енталпия, $[J/kg]$; T - средна температура, $[K]$; c_p - специфичен топлинен капацитет, $[kJ/kgK]$ $\rho v_* = \rho v + \overline{\rho' v'}$ - осреднен масов поток в напречно направление, изразен като едно цяло.

В уравненията по-горе, членовете $\tau = \overline{\rho u' v'}$ представляват тангенциалните напрежения, а $Q = \overline{\rho i' v'}$ - турбулентен топлинен поток.

Съгласно хипотезата на Бусинеск, величните τ и Q се представят чрез производните на средните скорости и температура в напречно направление:

$$\tau = -\mu_T \partial u / \partial y; Q = -\rho c_p a_T \partial T / \partial y \tag{4}$$

Динамичният коефициент на турбулентен вискозитет се представя чрез пътя на размесване:

$$\mu_T = \rho l_u^2 \left| \partial u / \partial y \right| \tag{5}$$

Температуропроводното число a_T по аналогия с динамичния път на размесване се представя съгласно зависимостта:

$a_T = \dfrac{\upsilon_t}{\Pr_t}$, където $\upsilon_t = l_u^2 \left(\dfrac{\partial u}{\partial y} \right)$

Съгласно горните зависимости за τ и Q могат да бъдат записани следните зависимости:

$$\tau = -\rho \upsilon_t \frac{\partial u}{\partial y}, Q = -\rho c_p \frac{\upsilon_t}{\Pr_t} \frac{\partial T}{\partial y} \tag{6}$$

Така уравненията, описващи разпространението и развитието на струйно течение в плосък нетоплоизолиран канал при съблюдаване на горните зависимости имат вида:

Уравнение за запазване на количеството на движение в надлъжно направление

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{eff}}{\partial y} \tag{7}$$

Уравнение за запазване на топлосъдържанието

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\partial Q_{eff}}{\partial y} \tag{8}$$

Уравнение за непрекъснатост

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_*) = 0 \tag{9}$$

Уравнение за запазване на количеството на движение в напречно направление

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \text{ т.е. } p = p(x) \text{ и } \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} \tag{10}$$

Уравнение на състоянието

$$p = \rho R T \tag{11}$$

Задачата се решава при следните начални и гранични условия на задачата:

- **Начални условия**

Разглежда се едновременното изтичане на две струи с различни начални параметри (фиг.3). За началния участък са в сила зависимостите за профила на скоростта и температурата:

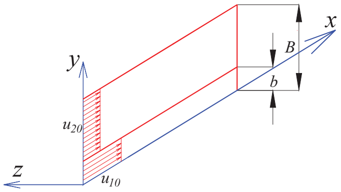
Скоростно разпределение

$$x = 0 \begin{cases} u = u_{10}, \text{ при } 0 \le y \le b \\ u = u_{20}, \text{ при b} \le y \le B \end{cases}$$

Температурно разпределение

$$x = 0 \begin{cases} T = T_{10}, \text{ при } 0 \le y \le b \\ T = T_{20}, \text{ при b} \le y \le B \end{cases}$$

За входа на канала $(x=0,\ 0 \le y \le B)$ се приема налягане p, равно на началното $(p = p_0)$.



Фиг. 3. Начални скоростни профили на струйните течения в плоския канал

Плътността за двете струи се пресмята съгласно зависимостта (11).

- **Гранични условия**

за скоростния профил

$$y=0\begin{cases}\dfrac{\partial u}{\partial y}=0,\ \tau_{eff}\approx\tau=0\\ \rho v_*=0\end{cases}$$

за температурния профил

$$y=0\begin{cases}\dfrac{\partial T}{\partial y}=0,\ Q_{eff}\approx\dot{Q}=0\\ \rho v_*=0\end{cases}$$

- Условия за прилепване и непроницаемост през твърда стена и топлообмен през стената

$$y=B,\ \ u=0,\ \ \rho V=0 \qquad y=B, Q_{eff}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial y}=-\dot{q}_w,$$

където $\dot{q}_w$ - плътност на топлинния поток през стената.

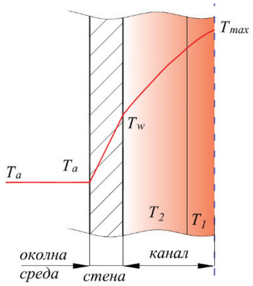
МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПЛООБМЕНА ПРЕЗ СТЕНАТА

При моделиране на топлообмена се приема, че по продължение на канала, дебелината на стената се запазва постоянна, т.е. $\delta = const$. Поради невисокотемпературните условия на топлопредаване, коефициента на топлопроводност се запазва постоянен $(\lambda = const.)$.

Приемайки едномерна топлопроводност, съгласно закона на Фурие се записва зависимостта за топлинния поток при стената на канала:

$$q=-\lambda\frac{\partial T}{\partial y} \qquad (12)$$

Разпределението на температурата от двете страни на канала и канала е представено на фиг.4. Приема се, че температурата на външната повърхност на стената е равна на тази на обкръжаващата среда (T_a). Температурата на вътрешната повърхност е функция на температурата на двете струи. Температурния профил на стената на канала е съгласно закона на Фурие. В случай на загряване, топлинния поток е насочен от околната среда към канала и обратно.



Фиг.4. Температурен профил при нетоплоизолиран канал

СЪЩНОСТ НА МЕТОДА НА ИНТЕГРАЛНИТЕ СЪОТНОШЕНИЯ

Използването на метода на интегралните съотношения при решението на конкретната задача включва в себе си следните два съществени момента:

1. Извод в удобна форма на необходимите интегрални съотношения, изразяващи основните и допълнителни закони в разглежданата система:

Съгласно [5] и след съответни преработки на $7 \div 11$ интегралните съотношения добиват вида:

Интегрално условие за запазване на масата и количеството на движение:

$$\int_0^B \rho u dy = \overline{I_1} = const.; \qquad \int_0^B \rho u^2 dy = \overline{I_2} - B\left[p(x) - p_0\right] + \overline{F_w}(x).$$

Интегрално условие за топлосъдържанието и енергията:

$$c_p \int_0^B \rho u T dy = \overline{I_1} + \overline{W_w}(x); \qquad \int_0^B \rho u^3 dy = \overline{I_3} - \frac{2R\overline{J_1}}{c_p} \ln\left|\frac{p(x)}{p_0}\right| + \overline{G_{in}}(x) - \overline{G}(x).$$

Интегрално условие за квадрата на температурата:

$$c_p \int_0^B \rho u T^2 dy = \overline{J_2} + \overline{H_w}(x) + \overline{H}(x).$$

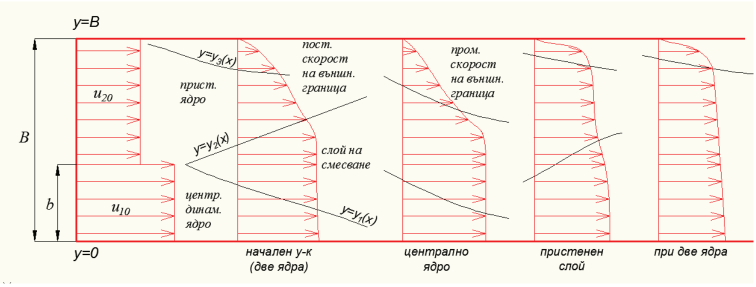
Величините $\overline{I_1}, \overline{I_2}, \overline{I_3}$ се изразяват чрез профила на скоростта в началното сечение; $\overline{J_1}, \overline{J_2}$ - зависят от профила на температурата на входа. Функциите $\overline{F_w}(x), \overline{W_w}(x), \overline{G}(x), \overline{H_w}(x)$ се определят чрез величини, зависещи само от надлъжната координата $x\left[\tau_w(x), q_w(x), p(x)\right]$. $\overline{G}(x)$ и $\overline{H}(x)$ зависят не само от величини, чието изменение е само по ос x, но такива и по ос y на канала.

2. Задаване на подходящи скоростни и температурни профили, описващи достатъчно точно динамичната и топлинна структура на изучаваното течение.

Решението на така поставената задача, съгласно [5] при сравнително прости течения, като например в граничен слой, в областта на смесване на двете струи, течението може да бъде представено посредством аналитични изрази, имащи елементарен характер - като степенен профил, алгебричен многочлен и др.

Задачата допълнително се усложнява и от фактът, че е налице топлообмен не само между две струи, но и между външната и околната среда през стената на канала. Така при развитието на течението в зависимост от началните условия могат да се дефинират различни подобласти.

Общия характер на разглежданото течение е комплексен, понеже се състои от основно течение и такова в граничния слой. Динамичната структура на смесване на две струи в канала е показана на фиг.5.



Фиг.5. Възможни профили на скоростта при различни режими на смесване

В [5] са представени зависимости за изменение на основните параметри на комплексното струйно течение за различните области и подобласти от неговото развитие.

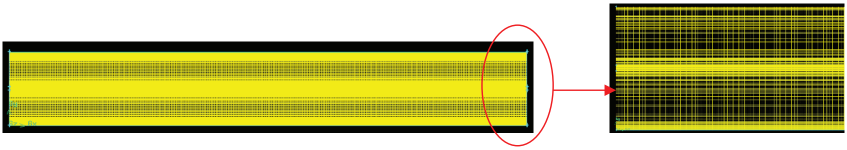
РЕЗУЛТАТИ:

Тук се прави опит за числено решение на разпространението на турбулентна струя в плосък канал при използване на CFD. Резултатите от численото решение ще бъдат сравнени с такива от интегралното. За да бъде възможно сравнението за начални условия на процеса на разпространение са приети следните параметри на струйните течения:

$$B = 0,2m, b = 0,01m \begin{cases} u_{10} = 40m/s, T_{10} = 293K \\ u_{20} = 4m/s, T_{20} = 303K \end{cases}$$

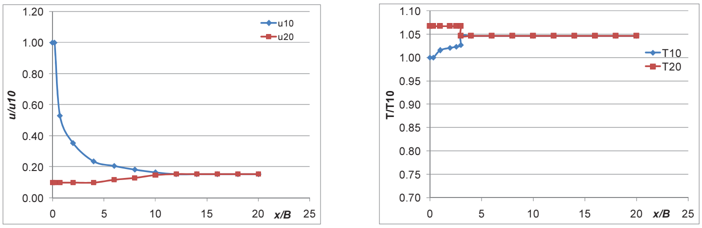
При моделиране на топлообмена със стената се приема, че температурата на повърхността е равна на тази на околната среда (фиг. 4).

За реализиране на численото решение е построена геометрия на плосък канал с представените по-горе размери (фиг. 6). Възприета е двумерна постановка на задачата, при което дължината на канала е по направление на ос x, а ширината на канала е по направление на ос y.



Фиг.6. Геометрия на канала и тип на омрежване

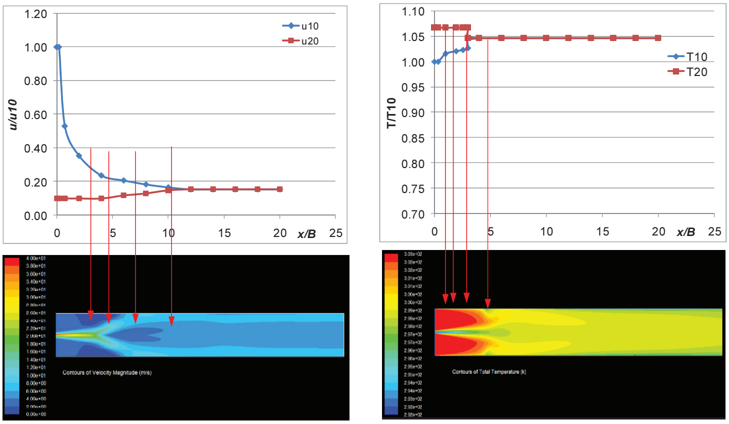
За по-голяма точност на численото решение, в областите в близост до каналната стена и на границата на смесване на двете струйни течения, омрежването е с по-малка стъпка (2mm). При моделиране на турбулентността е използван стандартния в симулационния пакет модел - $k - \varepsilon$.



а) б)

Фиг.7. Разпределение на а) скоростно поле, б) температурно поле при взаимодействие на две струи в плосък канал

На фиг. 7 а и б е представено интегралното решение на изменението на скоростта и температурата в плоския канал в надлъжно направление. От фиг. 7а е видно, че напълно развито течение се наблюдава след $x = 2m$ от началното сечение. След този участък скоростите на двете струи се изравняват и средната скорост достига стойност от порядъка на около $u = 7,2\ m/s$.



а)   б)

Фиг.8. Сравнение на разпределението на а) скоростно поле, б) температурно поле при интегрално и числено решение

На фиг. 8 а и б е представено сравнение между резултатите от численото решение и тези от интегралното. Съгласно интегралното решение пълното смесване между двете струи е налице след $x/B=10$ (фиг. 8а). При численото решение (фиг. 8б). това е налице при $x/B=9$. Дори след този участък мога да се забележат двете две обособени зони на постоянна скорост за основната и пристенна струи. По аналогичен начин е показано разпределението и на температурните полета. За разликата от скоростните полета, обаче, при интегралното решение, развитието на температурния профил е в участъка до $x/B=3$. За същият режим при численото решение - $x/B=7$. Тази разлика при двата метода на решение е вследствие от незачитане на предисторията на течението при интегралното решение. Въпреки това разликите при двата метода на решение не са съществени, което е предпоставка за използването на метода на интегралните условия за експресен анализ на течения в плосък, нетоплоизолиран канал. Предстои тестването на така поставената задача при ниски скорости на разпространение - от порядъка на 5 до 10 m/s - течения по-често срещани в инженерната практика.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Абрамович Г. Н., Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников, А. Н. Секундов, И. П. Смирнов, Теория турбулентных струй, М., Наука, 1984

[2]. Ал Делеми Х.Х.С, Струйни течения в ограничено пространство моделиращи елементи от кондиционирани устройства, Дис. За получаване на образователна и научна степен „Доктор", София

[3]. Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П, Щелков А.Н., Турбулентные струйные течения в каналах, Казань, Изд-во АН СССР, Казанскиий филиал,1988;

[4]. Антонов, И.С, Моделиране на двуфазни турбулентни струи, С., 1995, дисертация за получаване на научната степен д.т.н.

[5]. Ахмед Ал Делеми, Течение составной турбулентной струи в нетоплоизолированном плоском канале, Дисертация за получаване на образовтелна и научна степен „Доктор", 2009

[6]. Волков К.Н., Моделирование круоньх вихрей неизотермической струи,

истека'щей в затопленное пространство, Теплофизика высоких температур, т.46, стр.690-699
[7]. Воллмерс, Ротта, Автомодельные решения уравнений для средней скорости, енергии, турбулентности и ее масштаба, ракетная техника и космонавтика, 1977, т.5 стр. 130-137
[8]. Гиришович Т.А., О примеменении метода интегральных соотношений при изпользовании усложненных моделей турбулентности, инж.-физ. Журнал т. 36, стр.517-521,1979
[9]. Разински, Брайтон, Смешение струй в условиях безотривного течения в трубе, Теор. Основы инж.расчетов, сер. Д., 1972,т.94, с.40-47
[10]. Терзиев А., Числено моделиране на двуфазни течения с променлива плътност, докт. Дисертация, София, 2007
[11]. Черепин Н.Д., Поляков С.В., Исследование распространения осесимметричной турбулентной струи канале, Труды семинара по краевым задачам, вып 19, 1983, стр. 167-174
[12]. Hajikandi H., Mansoori A., A comparative assessment of turbulence models for axisymmetric confined jet with back pressure, J. Appl. Sci, vol. 7, num.1 , pp121-126

За контакти:

Доц. д-р Ангел Терзиев, Катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини", Технически Университет – София, тел.: 965 3443, e-mail: aterziev@tu-sofia.bg

Проф. д.т.н. Иван Антонов, Катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини", Технически Университет – София, тел.: 965 3367, e-mail: antonov94116@yahoo.com

Гл. ас. д-р Росица Величкова, Катедра "Хидроаеродинамика и хидравлични машини", Технически Университет – София, тел.: 965 3443, e-mail: rositsavelichkova@abv.bg

Докладът е рецензиран.