Изследване влиянието на различни параметри върху разпространение на дим и вредности в помещения. Математически модел.

А.Терзиев, И. Антонов, Р. Величкова

Study the influence of different parameters in the distribution of smoke and hazards in the premises. Mathematical model*: Numerical modeling of the spread of smoke and hazards arising from the burning of combustible materials here is presented. The mathematical model of fire in the room is consistent with the specifics of the ongoing complex in thermal and gas dynamic conditions processes. The mathematical model includes equations of continuity, energy and mass conservation. Modeling of turbulence is based on the well known in literature $k-\varepsilon$ model.*

Key words: *Fires in confined spaces, Mathematical modeling, Turbulence modeling*

ВЪВЕДЕНИЕ

В настоящата работа е представен математичен модел на разпространението на дим и вредности, възникващи в резултат на изгарянето на горими материали в затворени помещение. При съставянето на математическия модел е отделено особено внимание на протичащите при сложните термо- и газодинамични условия процеси. Математическото моделиране е съгласно възприетата неизотермичност на течението, градиент на налягането, двуфазност на течението и турбулентността. Основните преносни уравнения са уравнението за непрекъснатост, енергия и съхранение на масата. Затварянето на системата е съгласно възприетия модел на турбулентност ($k-\varepsilon$).

МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА ТЕЧЕНИЕТО

Математическото моделиране на разпространението на дим и вредности в помещението, генерирани в резултат на изгарянето на различни органични и неорганични материали е изключително трудна задача. Решението на една така система от уравнения, описваща процесите на горене и разпространение на вредностите в помещения може да бъде реализирано по числен път.

Разчета на топломасообмена при пожар с цел оптимизация действията на системи за пожарогасене, димоотвеждане и механична вентилация, се явява свързан с теоретичните задачи на топломасообмена.

Пожарът в помещенията протича в сложни термо-газодинамични условия при едновременно въздействието на редица фактори:

- Неизотермичност (разлика между температурите на твърди повърхности (фасадни стени) и газови потоци);
- Градиентите на налягането;
- Продухване;
- Протичането на химически реакции;
- Двуфазност (едновременно наличие на няколко фази);
- Турбулентност.

Действието на по-горе изброените фактори, води до значителна разлика в моделирането на топломасообмена от добре изследваните "стандартни" условия. Ето защо, при разглеждането на методите за пресмятане на един такъв тип течения, трябва да се отчитат и термогазодинамичните условия за неговото развитие.

Основните особености при топломасообменните процеси при наличие на пожар са следните:

- Максималната разлика в налягането в различните зони на помещението не превишава една десета от процента от стойността на средното налягане в помещението при отсъствие на взрив с ударна вълна;

- Скоростта на газовия поток е по-малък в сравнение със скоростта на звука (при отсъствие на детонационно горене и ударна вълна).
- Газовата среда се разглежда като вискозен, топлопроводим, свиващ се и идеален газ. Влиянието на твърдите частици на дима се отчитат при определянето на характеристиките на радиационния топлопренос вътре в помещението.

Математическото моделиране на преносните процеси се прави на базата на система от основни диференциални уравнения на закона за запазване на масата, импулса и енергията, както и допълнителни уравнения, необходими за затварянето на системата.

Основни уравнения от математическия модел

Уравнението за непрекъснатост в смес от газове се явява математически израз на закона за запазване на масата на газовата смес и има следния вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho w_x\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho w_y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho w_z\right)=0 \qquad (1)$$

Уравнението за енергията се явява математическо изражение на закона за съхраняване на енергията. За топлинните процеси този закон се изразява като първия закон на термодинамиката и има следния вид:

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial T}{\partial x}+w_y\frac{\partial T}{\partial y}+w_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda+\lambda_T+\lambda_p\right)\frac{\partial T}{\partial x}+$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\lambda+\lambda_T+\lambda_p\right)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(\lambda+\lambda_T+\lambda_p\right)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v, \qquad (2)$$

където:

T – температура, K;

c_p – специфичен топлинен коефициент, J/kgK;

λ – коефициент на топлопроводимост, W/mK;

λ_T – коефициент на турбулентната топлопроводимост, W/mK;

λ_p – коефициент на радиационната топлопроводимост, W/mK;

q_v – интензивност на вътрешните топлоизточници, W/m^3;

Закона за съхранение на масата на ***i***-тия газ, влизащ в състава на сместа, (уравнението за непрекъснатост за компонентите на газовата смес) има вида:

$$\rho\frac{\partial X_i}{\partial \tau}+\rho w_x\frac{\partial X_i}{\partial x}+\rho w_y\frac{\partial X_i}{\partial x}+\rho w_z\frac{\partial X_i}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\left(D_i+D_T\right)\frac{\partial X_i}{\partial x}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\left(D_i+D_T\right)\frac{\partial X_i}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\left(D_i+D_T\right)\frac{\partial X_i}{\partial z}\right)+m_i \qquad (3)$$

Уравнението за *състоянието на смесените идеални* газове има следния вид:

$$p=\rho RT, \qquad (4)$$

където: R – константа на газовата смес, J/kgK.

При съставянето на математическия модел е необходимо да се отчете и химическия състав на сместа. В състава на газовите смеси влизат: кислород, азот, продуктите на горенето (въглероден оксид, въглероден диоксид) и продуктите отделящи се при горенето на определен вид гориво. Газовата константа, плътността и специфичния топлинен капацитет на изобарно загретите газови смеси се изчисляват по формулите:

$$\rho=\sum_{i=1}^{n} r_i\rho_i \qquad (5)$$

$$R = \sum_{i=1}^{n} g_i R_i \tag{6}$$

$$c_p = \sum_{i=1}^{n} g_i c_{pi} \tag{7}$$

Уравненията за топлинната проводимост се явяват математически израз на закона за съхраняване и превръщане на енергията. Изведени отделно за температурните полета на стените, пода и тавана се препокриват с нестационарни триизмерни диференциални уравнения за топлинната проводимост и имат следния израз (вид):

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial z}\right) + q_{vw} \tag{8}$$

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}\right) + q_{vf} \tag{9}$$

$$\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial z}\right) + q_{vc}\,, \tag{10}$$

където:

T_w, T_f, T_c – температурата на материалите съответно на стените, подовете и таваните, K;

ρ_w, ρ_f, ρ_c - плътност на материалите в стените, подовете и таваните, kg/m^3;

c_w, c_f, c_c – отделна топлинна мощност на материалите в стените, подовете и таваните, J/kgK;

$\lambda_w, \lambda_f, \lambda_c$ **–** коефициент на топлопроводимост на материалите в стените, подовете и таваните, W/mK;

q_{vw}, q_{vf}, q_{vc} – Интензивност на вътрешните източници на топлина, W/m^3.

При липса на фазови преходи в материалите на конструкциите $q_{vw} = q_{vf} = q_{vc} = 0$. За случаите на фазови превръщания, метода на изчисляване на интензитета на вътрешните източници на топлина са дадени в техническата литература.

ГРАНИЧНИ И НАЧАЛНИ УСЛОВИЯ НА ЗАДАЧАТА

При равни температури на газовата среда вътре в помещението тази на околната среда - $T_{w0} = T_{c0} = T_{f0} = T_\alpha$;

При различни температури разпределението по дебелината на конструкцията се приема частично линейно-зависими в рамките на всеки слой от температурата на вътрешната повърхност, равна на T_{m0}, температурата на околната среда - равна на T_α, получени чрез стационарно-едномерна задача на топлопроводимостта на стената с гранични условия от първи ред.

В този случай T_{w0}, T_{c0}, T_{f0} и T_{m0}, са началните (преди пожара) температури на стените, тавана, пода и въздуха в помещението.

Граничните условия на вътрешната повърхност при негорими конструкции са сложни гранични условия [3] и имат следния вид :

$$q_1 = q_k + q_л\,, \tag{11}$$

където :

q_1 - локална плътност на сумарния топлинен поток в конструкцията, W/m^2;

q_k **-** локална плътност на конвективния топлинен поток в конструкцията, W/m^2;

$q_л$ - локалната плътност на лъчистия топлинен поток в конструкцията, W/m^2.

Граничните условия в уравненията на външната повърхност при негорими конструкции са сложни гранични условия [4] и имат следния вид :

$$q_2 = \varepsilon_2 \sigma \left(T_2^4 - T_a^4\right) + \alpha_2 \left(T_2 - T_a\right), \tag{12}$$

където:

q_2 - локална плътност на сумарния топлинен поток от конструкцията към околната среда, W/m^2;

T_2 - локална температура на външната повърхност на конструкцията, K;

T_a - температурата на въздуха, K;

ε_2 - степен на чернота;

σ - коефициент на излъчване на абсолютно черно тяло, KW/mK^4;

α_2 – локален коефициент на топлоотдаване при свободна конвекция на външната повърхност на конструкцията към околната среда, W/m^2K;

МОДЕЛИРАНЕ НА ТУРБУЛЕНТНОСТТА

Моделирането на турбулентността е съгласно опростения модел на турбулентност - $k-\varepsilon$ модел [2]. При този модел се предполага (приема), че коефициентът на турбулентния вискозитет зависи от кинетичната енергия на турбулентността и скоростта й на разсейване в съответствие с формулата на Колмогоров [2]:

$$\upsilon_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \tag{13}$$

където: υ и υ_t са кинематичните коефициенти на молекулярния и турбулентен вискозитет, m^2/s;

$k = \frac{1}{2}\overline{\left(w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2\right)}$ - турбулентна кинетична енергия, m^2/s^2;

$w_x'^2, w_y'^2, w_z'^2$ – скоростни пулсации, проектирани върху съответните оси, m/s;

$C_\mu = 0,09$ - емпирична константа;

$\varepsilon = v\overline{\left(\left(\frac{\partial w_x'}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_y'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_z'}{\partial z}\right)^2\right)}$ - скорост на дисипация, m^2/s^3

Коефициентът на динамичния молекулярен вискозитет на газа се определя чрез стойността на кинематичния молекулярен вискозитет, изчислен по формулата на **Съзерленд** [3]:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1+\frac{C}{T_0}}{1+\frac{C}{T}}\sqrt{\frac{T}{T_0}}, \tag{14}$$

където :

C – емпиричната константа за конкретния газ, K;

μ – коефициент на динамичния молекулярен вискозитет, Pa/s;

μ_0 – известна стойност на динамичния вискозитет при избрана температура T_0, $kg/m.s$. Стойностите на C и T_0 се вземат от строителни справочници.

За определянето на кинетичната енергия на турбулентността и нейната скорост на разсейване се решават следните диференциални уравнения на законите за запазване на съответните величини [2]:

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial k}{\partial x}+w_y\frac{\partial k}{\partial y}+w_z\frac{\partial k}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+ \\ +\upsilon_t\left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j}+\frac{\partial w_j}{\partial x_i}\right)+\frac{g}{\mathrm{Pr}_T}\frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\varepsilon \tag{15}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+w_y\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}+w_z\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+ \\ +C_1\frac{\varepsilon}{k}\upsilon_T\left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j}+\frac{\partial w_j}{\partial x_i}\right)+\frac{g}{\mathrm{Pr}_T}\frac{1}{T}\frac{\partial T}{\partial z}\right)-C_2\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{16}$$

В стандартния $k-\varepsilon$ модел на турбулентност наборът от емпирични константи е, както следва [1]: $C_1=1,44$; $C_2=1,92$; $\sigma_K=1,0$; $\sigma_\varepsilon=1,3$; $C_\mu=0,09$. При конвективни течения константата $C_1=1,6$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Създаден е математичен модел на процесите на разпространение на дим и вредности, генерирани в резултат на изгарянето на органични материали в затворени помещения. Математическия модел включва основните преносни уравнения - за непрекъснатост, енергия и съхранение на масата. Затварянето на системата уравнения се осъществява посредством подходящ модел на турбулентност - $k-\varepsilon$. Записани са началните и гранични условия на задачата, при които ще бъде реализирано численото решение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гинзбург В. Л., Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века), Успехи физических наук, 1999. Т. 169, № 4.
[2] Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа. М., Наука, 1987.
[3] Кутателадзе С. С., Основы теории теплообмена. М., Атомиздат, 1979.
[4] Кошмаров Ю.А., М. П. Башкирцев Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М., ВИПТШ МВД СССР, 1987

За контакти:

гл. ас д-р Ангел Терзиев, Технически университет – София Катедра “ХАД и ХМ”, e-mail: aterziev@tu-sofia.bg

проф. д.т.н. Иван Антонов, Технически университет – София Катедра “ХАД и ХМ”, e-mail: mfantonov@abv.bg

ас. д-р Росица Величкова, Технически университет – София Катедра “ХАД и ХМ”, e-mail: rositsavelichkova@tu-sofia.bg

Докладът е рецензиран.