

## ДВИЖЕНИЕ НА ВЪЗДУХА ВЪВ ВЕНТИЛАЦИОННИ ОБЕКТИ С ГОЛЯМ ОБЕМ

Елена Власева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"  
София 1700, България  
[ELENA@MGU.BG](mailto:ELENA@MGU.BG)

Мария Петкова

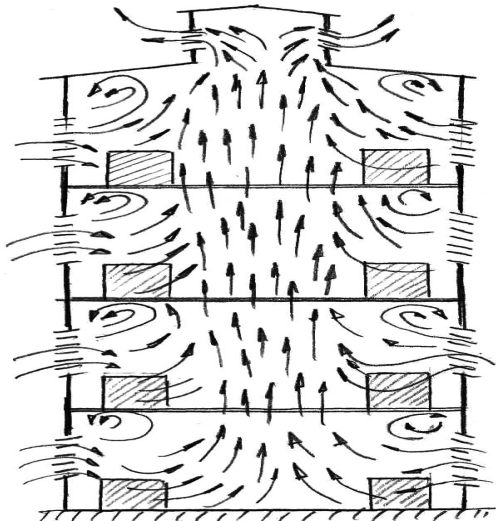
Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"  
София 1700, България  
[petkovamaria@abv.bg](mailto:petkovamaria@abv.bg)

### РЕЗЮМЕ

Основната задача на вентилацията е чрез контролиране на отделянето и изнасянето на вредности да се осигури безопасна за хората и съоръженията въздушна среда. Процесите на разпространение на вредности и изнасянето им от въздушните течения са добре изучени и управляеми във вентилационни обекти с насочено движение на въздуха, но са проблем във вентилационни обекти с голям обем. При тях се наблюдават различни по състав и аеродинамика зони. Доклада представя параметрите на такива вентилационни обекти и основните зависимости, по които се описват разпространението на вредности и въздушните течения в тях.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Насоченото движение на въздушни потоци във вентилационни системи предполага добре канализирани въздушни пътища с ясно дефинирани аеродинамични характеристики. Повечето от минните изработки в подземните рудници представляват именно такива обекти. Съществуват и такива конфигурации, подлежащи на проветряване, в които вентилационния поток не е ясно изразен, налице са пространства със свободни и полуограничени струи, застоини и рециркулационни зони.



Фигура 1. Индустриално хале

Подобни вентилационни конфигурации се наблюдават в голяма част на обектите на промишлената вентилация [2] – индустриални халета с различни по вид, действие и състав източници на топлина и примеси, надземните съоръжения на един подземен рудник, камерообразни изработки, глухи минни изработки, метро станции, подземни гаражи. Класифицирането на един обект като

Вентилационен обект с голям обем (ВОГО) предполага дефиниране на критични съотношения между размери, вентилационни отвори и други параметри на обектите включително аеродинамични характеристики и критериални числа на подобие.

Един от възможните подходи за анализиране на движението на въздушните потоци е физично и математично моделиране, включващо:

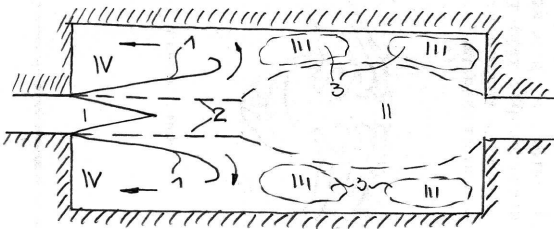
- изясняване на потенциални източници на вредности след анализ на разглежданите процеси;
- описване на източниците и тяхното действие;
- моделиране на разпространението им;
- очертаване на зоните, в които се нарушават вентилационните и работни условия;
- набелязване на вентилационни мероприятия;
- моделиране влиянието им;
- анализ на резултатите.

Настоящата статия третира част от тези въпроси, а именно – представянето в математичен вид на зависимостите, представящи основните процеси, протичащи в разглежданите обекти.

### ВЕНТИЛАЦИОННИ ОБЕКТИ С ГОЛЯМ ОБЕМ

Както беше казано вече във въведението в доклада се анализират вентилационни обекти, при които не се наблюдава еднакъв режим на течението, насочено в една преобладаваща посока. Такива обекти са представени на фигури 1, 2 и 5. В зависимост от предназначението на отделните участъци от обекта могат да се дефинират контролирани, неконтролирани и изолирани зони (фигура 3). От гледна точка на постъпването и разпространението на въздушни дебити зоните са свободни или

полуограничени струи, основно въздушно течение, рециркулационни зони, застойни зони.



Фигура 2. Камерообразна минна изработка

Тези най-общии закономерности за разглеждания клас обекти зависят от геометрични, аеродинамични и вентилационни характеристики. Геометрично обектите се представят чрез дължина (L), широчина (B) и височина (H), както и площ на отворите, през които постъпва и/или се отвежда отработения въздух. Един пример за индустриално хале с голям обем е със следните размери – основно помещение с размери: дължина 180 m; широчина 45 m; височина – 20.95 m (15.50 до покрива и 17.30 до фонара). Покрива е с фонар с прозорци, разположени по дължината на сградата. Обемът на цеха е 137 214 m<sup>3</sup>, което го причислява към вентилационните обекти с голям обем. Отворите, през които би могло да постъпва чист въздух и да се отвежда отработения са разположени на коти 0.00, 4.50, 10.30 и 17.30. Площите им (не всички отваряеми) са приблизително 2000 m<sup>2</sup>. Едно утежняващо проветряването обстоятелство е наличието на технологични отвори в пода на кота 4.50 с обща площ 716 m<sup>2</sup>, които създават локални циркулационни течения, без да способстват за разпределението на проветряващите дебити.

Друг клас от ВОГО са камерообразните минни изработки. Техните размери варират в границите 150 x 10 x 7 m, като размерите на отворите на въздухоподаващите изработки също са променливи. За тях важат някои съотношения [7]:

- Ако височината на въздухоподаващата изработка и височината на камерата са равни, а ширината и е незначителна в сравнение с тази на камерата, то в камерата се образува плоска свободна струя.
- Ако височината и ширината на изработката, подаваща чист въздух са незначителни в сравнение с височината и ширината на камерата, то в камерата се образува кръгла свободна струя или близка към нея.

Първоначална класификация на помещенията за проветряване може да се направи въз основа на следните зависимости:

- **Късо помещение:** Чистият въздух се отразява в отсрещната стена. Извън зоната на струята се наблюдава рециркулационна зона, в която се смесва чист с отработен въздух. Количеството чист въздух е по-голямо от отвеждания отработен въздух. За да се проветрява едно помещение чрез насочен поток, постъпващ през един вентилационен отвор, дължината му трябва да се подчинява на зависимостта:

$$L \leq 0,62 k_1 \sqrt{BH} \text{ , където:}$$

$k_1$  – коефициент на разпадане на вентилационната струя,

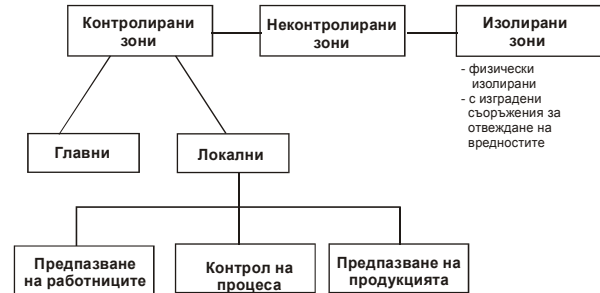
$$\frac{u_{\max}}{u_0} = k_1 \frac{\sqrt{A_0}}{x}$$

$u_{\max}$  – максимална скорост на изтичане от вентилационния накрайник, m/s;

$u_0$  – средна скорост на изтичане на вентилационната струя, m/s;

$A_0$  – действителна площ на изтичане на струята, m<sup>2</sup>;

$x$  – разстояние от мястото на изтичане, m



Фигура 3. Участъци от проветрявания обект

- **Дълго помещение:** ако  $L > 0,62 k_1 \sqrt{BH}$ . Постъпващата чиста струя се разпада и реверсивните потоци стават доминиращи. Дефинира се критична дължина, на която струята се стеснява вместо да се разширява ( $x_{\max} > L_{\text{крит}}$ ). Според норвежки изследователи  $x_{\max} \approx 3,3 \sqrt{BH}$  [4].
- **Широко помещение:** За да се проветрява дадения обем чрез постъпващ през един отвор чист въздух трябва  $B \leq 3H$ . Ако  $B > 3H$  помещението се класифицира като дълго.

### МОДЕЛИРАНЕ ОТДЕЛЯНЕТО И РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ВРЕДНОСТИ

Източниците на замърсяване се класифицират според мястото на отделяне на:

- външни;
- вътрешни;
- свързани с вентилационната система.

Външният въздух е по правило по-малко замърсен от този, който напуска проветряваните обекти, освен ако не се допусне грешка при отвеждането на отработения въздух и неговото повторно въвеждане в проветряваните пространства. Източниците, свързани с вентилационните инсталации, обикновено се дължат или на неправилна експлоатация или на не добре преценен проект на системата.

Вътрешните източници могат да бъдат:

- химически (отделени във въздуха прахови, газови или парови частици) – прах, дим, газ, пари, аерозоли, мъгла;
- биологични – бактерии, вируси и други живи организми;

- физически вредности – топлинни параметри (температура, скорост, относителна влажност) извеждащи човешкия комфорт извън нормалните параметри и предизвикващи радиация, шум, вибрации и други последващи явления.

На фигура 4 са систематизирани основните параметри, които определят процеса на образуване, отделяне и разпространение на вредности. При моделирането и изучаването на това разпространение следва да се отчетат всички влияещи фактори и да се обоснове разглеждане или пренебрегване на едни или други предвид конкретния проблем. Типа замърсител, неговите свойства, както и поведението им във времето са параметри, които се дефинират достатъчно точно. По-особено внимание следва да се обърне на емисионните фактори, някои от които са представени със следните изрази:

При процес, за който са известни параметрите на образуване на вредностите

$$M = R_1 \cdot T_{\text{процеса}}$$

където:

M – количество вредно вещество, отделено за единица време, kg/h;

R<sub>1</sub> – количество отделен газ, дим, пара или друга вредност, kg/min;

T<sub>процеса</sub> – средно време за отделяне на вредността за един астрономически час, min/h;



Фигура 4. Характеристики на източниците

При разлика в наляганята в/извън тръбопровод

$$M = kCV \sqrt{\frac{m}{T}} \quad (1)$$

където:

k – коефициент  $k \in (1 \div 2)$ ;

C – коефициент, зависещ от налягането в тръбопровода

Налягане, atm	<2	2	7	17	41
Коефициент C	0,121	0,166	0,182	0,189	0,192

V – вътрешен обем на тръбопровода, m<sup>3</sup>;

m – молекулно тегло на газа/парите

T – температура в тръбопровода, °C

Емисия на газ от отворени пространства (резервоар, разливи на течност върху пода)

Използват се критериалните числа на Нюселт, Прангл и Грашов:

$$Nu = \frac{ud}{D}; \quad Pr = \frac{v}{D}; \quad Gr = \frac{ud^3(\rho_0 - \rho_1)}{v^2 \rho_1}$$

където:

d – характерен размер, m;

u – скорост на отделяне на вредността от разглежданата повърхност, m/s;

D – коефициент на дифузия, m<sup>2</sup>/s;

v – коефициент на кинематичен вискозитет, m<sup>2</sup>/s;

ρ<sub>0</sub> – плътност на въздушната среда, kg/m<sup>3</sup>;

ρ<sub>1</sub> – плътност на въздушната среда в близост до изпаряващата се повърхност, kg/m<sup>3</sup>;

- Емисия при ламинарен режим на течението ( $2.10^2 < Gr Pr < 2,3.10^8$ )

$$M = F.A.d^{-1/4} D^{1/2} (C_1 - C_0)^{5/4} [(M_{air} / M_l - 1)]^{1/4} \text{ g/s} \quad (2)$$

където:

0,334 при  $M_{air} > M_l$

0,184 при  $M_{air} < M_l$

0,224 за мокри вертикални повърхности

A – площ, m<sup>2</sup>;

M<sub>air</sub> – относително молекулно тегло на въздуха;

M<sub>l</sub> – относително молекулно тегло на изпаряващото се вещество

- Емисия при турбулентен режим на течението

$$M = F.A.D^{1/3} (C_1 - C_0)^{4/3} [(M_{air} / M_l - 1)]^{1/3} \text{ , g/s} \quad (3)$$

където:

150 при  $M_{air} > M_l$

75 при  $M_{air} < M_l$

113 за мокри вертикални повърхности

Интензивност на изпарение:

$$M = 7.4(a + 0.017V) (P_2 - P_1) 101.3 \frac{A}{P_B} \quad (4)$$

където: M е интензивността на изпарение [kg/h]

V – нормална на изпарението компонента на скоростта на въздуха, [m/s]

a – коефициент на подвижността на въздуха. Определя се по зависимости, представени в [4]

P<sub>2</sub> – налягане на наситените водни пари над течността, kPa

P<sub>1</sub> – налягане на водните пари над течността, kPa

A – открита повърхност на течността, m<sup>2</sup>

$P_B$  - барометрично налягане, кРа.

Газове, пари и прахови частици с малки размери се разпространяват във въздушното пространство под влияние на конвективните насочени потоци на организираното проветряване както и под влияние на турбулентната и молекулна дифузия. Основното уравнение, което представя процеса на разпространение на вредност с концентрация  $C_A$  е уравнението на турбулентната дифузия:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + u_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + q_c \quad (5)$$

Граничните и начални условия са представени в таблица 1 и следва да се уточняват за всеки конкретен случай.

Един опростен израз за определяне на концентрацията на проследяваната вредност  $C_x$  на разстояние  $x$  от източника е:

$$C_x = C_0 e^{-\frac{u}{D}x} \quad (6)$$

където:

$C_0$  – концентрация на източника,  $mg/m^3$ ;

$u$  – скорост на въздушния поток,  $m/s$ ;

$x$  – разстояние от източника,  $m$ ;

$D$  – коефициент на дифузия,  $m^2/s$ .

Стойността на  $D$  зависи от скоростта на въздушния поток и от начина на постъпването и разпространението му. В зоната на действие на постъпващия за проветряване въздушен поток (докато струята не се е разпаднала) той се изчислява по известни формули [Тейлър, Лайгна и др]. Извън тази зона е приложима следната формула [4]:

$$D = c\varepsilon \frac{1}{3} \ell^{\frac{4}{3}}, m^2/s \quad (7)$$

където:

$c = 0,25 \pm \Delta$  - коефициент при интервал на надеждност  $\Delta$ ;

$\ell = \begin{cases} \text{височина на помещението} \\ \text{диаметър на вентилационната инсталация} \end{cases}$

$\varepsilon = \frac{E_{ном.}}{M \tau}$  е кинетичната енергия, която се губи във

въздушна маса  $M[kg]$  за време  $\tau [s]$ .

$$E_{ном.} = \sum E_{струи} + \sum E_{конв.} + \sum E_{обекти}$$

$$E_{струи} = \frac{1}{2} \rho V u^2$$

$$E_{конв.} = \frac{g W_{конв.} H}{1,8 c_p T_0}, \quad W_{конв.} - \text{конвективен компонент на}$$

топлинния източник

$$E_{об.обекти} = \frac{1}{2} k A u^2 \rho t$$

Таблица 1. Гранични условия

Гранично условие	Задавани стойности на потока	Скаларни величини
Приток на чист въздух	Дебит, скорост, налягане	T (температура), C <sub>i</sub> (концентрация на вредност i); степен на турбулентност
Отработен въздух	Дебит, скорост, налягане	T (температура), C <sub>i</sub> (концентрация на вредност i);
Големи отвори	P <sub>пълно</sub>	T (температура), C <sub>i</sub> (концентрация на вредност i); степен на турбулентност на притока на въздух в зоната
Стени	$\vec{v} = 0$ топлинен поток, външен приток	T (температура),
Източници на вредности	S <sub>c</sub> – емисия на вредност топлинен поток	

### МОДЕЛИРАНЕ ДВИЖЕНИЕТО НА ВЪЗДУХА

При движението на въздуха в проветрявани обекти с голям обем се наблюдават няколко типа зони:

- основно въздушно течение;
- свободни или полуограничени струи, генерирани от въздухоподаващите съоръжения;
- рециркуляционни зони;
- застоини зони

Чрез математичното моделиране [5,3] следва да се дефинират тези зони и да се получава решение при преминаване от един режим в друг – силно турбулентен, слабо турбулентен, преходен, ламинарен. Класическият модел в механиката, представящ въздушно турбулентно течение се задава чрез уравнението на непрекъснатостта и на движението (Навие-Стокс):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial (\rho u_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (8,9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \bar{u}_i \bar{u}_j \right] + \rho \beta \delta_{i2} (T - T_{ref})$$

$$\vec{u} = u(x_1, x_2, x_3; t)$$

където:

$$\rho = \rho(x_1, x_2, x_3; t)$$

Използвани са индекси i и j вместо традиционните x,y,z за да се премине по-лесно към числени изрази и към числен модел на представените уравнения.

Вместо уравнение (9) се използва опростения турбулентен модел, а именно:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \beta \delta_{i2} (T - T_{ref}) \quad (10)$$

Най често прилагани турбулентни модели за решаване на уравнението на Навие-Стокс са k-ε и k-ω. Турбулентната вискозност се представя във вида:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{за } k-\varepsilon \text{ модел и } \mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega} \quad \text{за } k-\omega \text{ модел}$$

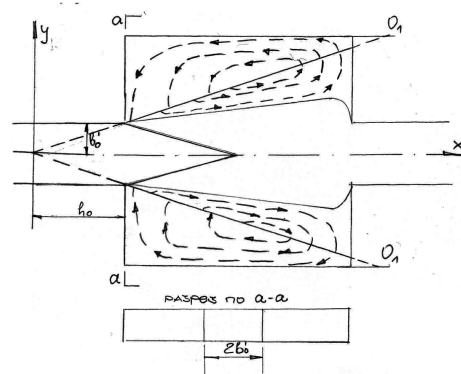
Използването на турбулентен модел е наложително, за да се моделират всякакви случаи на турбулентност [1,4], както и преминаването от един режим към друг. k-ε модела създава числени проблеми при зони със слаба турбулентност. Причината е, че когато k → 0 изразът  $\frac{\varepsilon^2}{k}$  представящ турбулентната дифузия в ε уравнението клони към безкрайност. ε уравнението е:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (11)$$

Такъв проблем не съществува при k-ω модела:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \left( \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\omega}{k} (C_{\omega 1} P_k - C_{\omega 2} \rho \omega)$$

При него в зони с ниска турбулентност дифузионният член клони към 0 и не създава числени проблеми. Специално внимание при моделирането на въздушни течения в проветрявани обекти с голям обем следва да се обърне на вентилационните струи, които до голяма степен предопределят ефективността на вентилационните въздействия и на избраната стратегия на проветряване [1].



Фигура 5. Елементи на свободна струя

Вентилационните струи са резултат от насоченото проникване на въздух през вентилационни отвори. Ако няма влияние на стени, тавани и други струи, разглежданата струя може да се класифицира като свободна. Твърде често обаче нейната идентичност и класическо развитие се влияят от реверсивни потоци или

други течения в пространството с различна температура, довеждащи до създаване и действие на архимедови сили. Свободните струи се класифицират според вида на вентилационния отвор на: съсредоточени, линейни, овални, конични, спираловидни. Наблюдават се основно 4 зони в развитието и съществуването на струите (фигура 5)

- Зона 1 (струйно ядро) – къса зона ( $2 \div 6d$ ). Скоростта по осовата линия е приблизително същата, като скоростта на изтичане;
- Зона 2 (преходна зона) – Зависи от типа на отвора. За съсредоточени отвори е от 8 до  $10d$ . Максималната скорост по осовата линия е обратно пропорционална на квадрата на разстоянието от началото на струята;
- Зона 3 (развита турбулентна зона). Дължината ѝ зависи от типа отвор, от началната скорост, от турбулентността в помещението. Тази зона е най-интересна от инженерна гледна точка, тъй като това следва да е мястото, където се осъществява проветряването;
- Зона 4 (зона на разпадане) или мястото, където струята загубва своята идентичност.

По-долу се представят изрази за определяне на скоростта в произволна точка от струята. Предполага се правоъгълен отвор на изтичане с размери  $2L \times 2B$ . В точка с координати  $x, y, z$  спрямо координатна система с начало центъра на струята, скоростта се представя чрез израза:

$$u(x, y, z) = \frac{u_0}{2} \sqrt{\left( \operatorname{erf} \frac{L-y}{cx} + \operatorname{erf} \frac{L+y}{cx} \right) \left( \operatorname{erf} \frac{B-z}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B+z}{cx} \right)} \quad (12)$$

Скоростта по осовата линия ( $y=0, z=0$ ) е:

$$u(x) = u_0 \sqrt{\operatorname{erf} \frac{L}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B}{cx}} \quad (13)$$

Горните изрази се отнасят за зони 1 до 3.

Ако отвора е правоъгълен с голяма дължина ( $L \rightarrow \infty$ ) и широчина  $2B$  (линеен отвор) изразът за скоростта е следния:

$$u(x, y, z) = \frac{u_0}{2} \sqrt{\operatorname{erf} \frac{B-z}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B+z}{cx}} \quad (14)$$

а по осовата линия е:

$$u(x) = u_0 \sqrt{\operatorname{erf} \frac{B}{cx}} \quad (15)$$

Скоростта по осовата линия за струя през кръгъл отвор [4] е:

$$\frac{u(x)}{u_0} = 1 - \exp\left(-\frac{d^2}{4c^2x^2}\right) \quad (16)$$

По-долу са дадени някои известни съотношения [7] за формиране на теченията в пространства с голям обем:

- Ако числото на Re, отнесено към началното сечение на свободната струя, е със стойности по-големи от 1900-2500, в помещението се образува само турбулентна струя, започваща от входното отворстие

- Ако числото на Re е по-малко от 1900 в помещението могат да бъдат само ламинарни струи, или ламинарно-турбулентни, като последните се образуват при  $Re \cong 1800$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследване на разпространението на въздушните маси, а оттам и на отделените вредности, може да се осъществи при прилагане на следните подходи:

- извършване на експериментални измервания и изчисления;
- математично и компютърно симулиране;
- комбинация от горните два подхода.

Математичното и компютърно симулиране включва:

- описание на физичния проблем в математичен вид (уравнения, зависимости, коефициенти);
- трансформиране на уравненията в компютърен модел;
- числено решаване на модела.

Математичното и компютърно симулиране [3,6] скъсява съществено пътя на изследване на даден проблем от практиката. Този подход е особено полезен в следните случаи:

- когато липсват данни и възможност от измервания за реалния обект;
- когато проблемът е комплексен – в нашия случай наличие на голям брой различни по структура и образуване взаимодействащи си зони;
- когато са известни граничните условия – постъпващи и отвеждани количества въздух;
- при необходимост от оптимизиране на параметрите с цел избиране на по-ефективни схеми.

Като допълнително предимство на симулационните модели може да се изведе и факта, че ще се изяснят местата и параметрите, за които следва да се извършват измервания за уточняване на моделите и привеждането им към реалността.

Представените математични модели (общи и опростени) ще служат за определяне на скоростното поле, а оттам и на зоните, на които ще се разделят проветряваните обекти.

*Уточняване на параметрите, експерименти по адекватност на моделите с реалните обекти, избиране на приложими математични методи за привеждане на уравненията за числено решаване, както и самите решения са обект на следващи разработки.*

## ЛИТЕРАТУРА

- Абрамович, Г.Н., 1960, 1984, Теория на турбулентните струи, Физматиздат, Москва.
- Елтерман В.М., 1980, Проветряване химических предприятий, Химия, Москва.

Allard F et.al. 1986, Fundamentals of multizone airflow model – COMIS, Coventry, Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC),.

Industrial Ventilation – design guide book, 2001, edited by H. Goodfellow, E. Tahtii, Academic press, Hardcourt Science and Technology Company, , p. 1519.

Hanjalic K., 1994, Advance turbulence enclosure models: a view of current status and future prospects, Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 15, pp. 178-203,.

Davidson I., 1989, Ventilation by displacement in a three dimensional room: A numerical study, Build. Environ., vol. 24, pp. 363 – 372,.

Воронин, Основы рудничной аэрогазодинамики.

*Препоръчана за публикуване от катедра  
“Руднична вентилация и техническа безопасност”, МТФ*

# AIR DISTRIBUTION IN LARGE VOLUME VENTILATION OBJECTS

Elena Vlasseva

Maria Petkova

University of Mining and  
Geology "St. Ivan Rilski"  
Sofia, 1700 Bulgaria  
elena@mgu.bg

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"  
Sofia, 1700 Bulgaria  
petkovamaria@abv.bg

## ABSTRACT

Main task of ventilation is to ensure safety environment for people and equipment via pollutants' liberation and distribution control. Processes of emissions and distribution by air currents in ventilation objects with one directional flow are well studied and controlled though they are problem in ventilation objects with large volumes. In such objects different aero-dynamical zones exist. This paper comments parameters of ventilation objects with large volumes and presents main expressions, describing pollutants and air flows distribution.

## INTRODUCTION

Directed flows of air currents in ventilation systems assumes well controlled ventilation paths with clearly defined aero-dynamical characteristics. Majority of mine workings can be described as the above-mentioned objects. There exists though such configurations, object to ventilation, where ventilation current is not clearly defined, zones with free and semi-restricted jets, stagnation and recirculation ones can be observed.

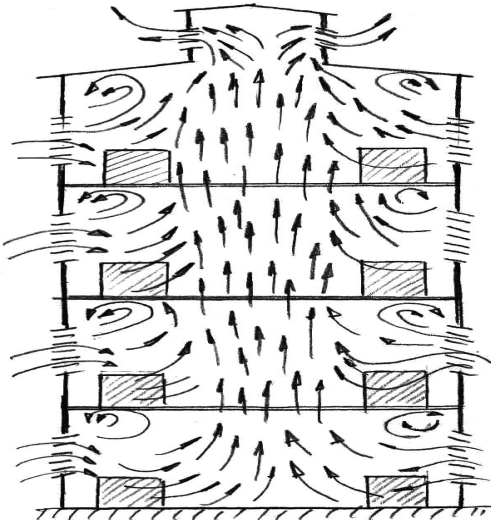


Figure 1. Industrial plant

Similar ventilation configurations are many of industrial ventilation objects [2] – industrial plants and halls, with different in type, action and consistence heat and mass sources, surface facilities of underground mine, camera type and blind mine workings, metro stations, car parks etc. Classification of one object as Ventilation Object with Large Volume (VOLV) assumes definition of critical relationships between dimensions, ventilation in and out flows, aero-dynamical characteristics, and similarity criteria.

One possible approach for analysis of air flows distribution is physical and mathematical modelling, which include:

- Based on analysis of technological processes clarification of all potential sources;
- Description of sources and their influence;
- Modelling of their distribution;
- Zones description where safety conditions are violated;
- Planning of ventilation measures;

- Modelling of their influence;
- Results analysis.

This paper deals with part of these problems, namely – mathematical expressions, presenting main processes in ventilation objects with large volumes.

## VENTILATION OBJECTS WITH LARGE VOLUMES

As already mentioned in the introduction, ventilation object with uniform flow modes in different zones and directions of ventilated volume are analysed in this paper. Figures 1, 2 and 5 present such objects. Depending on purpose of different sections of objects, controllable, uncontrollable and isolated zones can be defined (figure 3). From other side, in regard to way of air inflow and distribution zones with free and semi-restricted jets, main air current, stagnation and recirculation zones exist.

These general determinations for analysed types of objects depend on geometrical, aero-dynamical and ventilation characteristics. Objects' dimensions are presented by length (L), width (B) and height (H), as well as inflow/outflow holes, serving as supply and exhaust air paths. One example of industrial plant with large volume is represented by main hall with length 180 m; width - 45 m; height – 20.95 m (15.50 to the roof and 17.30 to фонара).

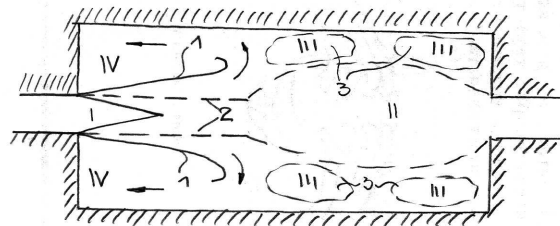


Figure 2. Camera type mine working

The roof is with фонар, having windows along the whole hall length. Plant volume is 137 214 m<sup>3</sup>, which assigns it as VOLV. Inflow/outflow supply/exhaust openings are located at levels 0.00, 4.50, 10.30 and 17.30. Their surfaces (not all of the open able) are approximately 2000 m<sup>2</sup>. One impeding factor is existence of great holes at level 4.50 with whole surface 716 m<sup>2</sup>. They create local circulation currents, which prevent proper distribution of available air.



Other VOLV class are camera type mine workings. Their dimensions vary in ranges 150 x 10 x 7 m. Supply/exhaust openings are also variable. For this types of objects are valid following relationships [7]:

- If air supply working height equals to the chamber height, while its width is incomparable small to its width then flat free jet is formed in the camera.
- If height and width of air supply working are incomparable in dimensions with corresponding camera dimensions then round free jet or very similar to it is formed.

Initial configuration of ventilated areas can be done based on the following expressions:

- **Short premises:** Fresh air is reflects in the opposite wall. Beyond the jet zone re-circulation zone is composed, where fresh and exhaust air is mixed. Supply air is more than exhaust one. In order to ventilate one premises by directed through one supply place flow, its length should comply with the expression:  $L \leq 0,62 k_1 \sqrt{BH}$ , where:

$k_1$  – air jet disintegration coefficient,

$$\frac{u_{\max}}{u_0} = k_1 \frac{\sqrt{A_0}}{x}$$

$u_{\max}$  – maximal outflow velocity of ventilation tag, m/s;

$u_0$  – average velocity of air jet, m/s;

$A_0$  – area of jet inflow, m<sup>2</sup>;

$x$  – distance from inflow location, m

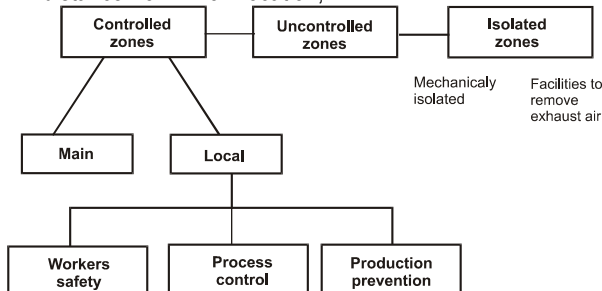


Figure 3. Zones of ventilated object

- **Long premises:** if  $L > 0,62 k_1 \sqrt{BH}$ . Inflowing fresh air jet disintegrates and reversed flows become dominated. Critical length, for which jet is shortened, is defined ( $x_{\max} > L_{kpum}$ ). According to Norwegian researchers [4]  $x_{\max} \approx 3,3 \sqrt{BH}$ .
- **Wide premises:** In order to ventilated one premises through fresh air, inflowing from one hole, the following expression should be valid:  $B \leq 3H$ . If  $B > 3H$  premises is classified as long one.

#### MODELLING OF POLLUTANTS' LIBERATION AND DISTRIBUTION

Pollutant sources according to the place of their liberation are classified as:

- external;

- internal;
- linked with ventilation system.

Outside air is normally less polluted, compared with the exhaust air out flowing from ventilated object unless due to mistake in ventilation the exhaust air become a supply one. Sources, associated with ventilation system usually are as a result either of improper operation or bad project.

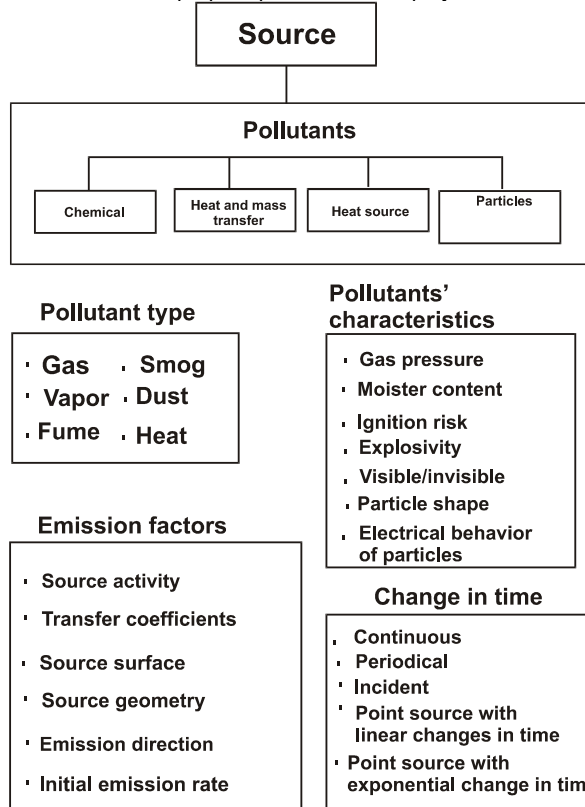


Figure 4. Source characteristics

Internal sources can be:

- chemical (particles, gas, aerosols, vapors, smog);
- biological (bacteria, viruses);
- physical – heat parameters (temperature, velocity, moisture) leading to human discomfort beyond normal parameters and causing radiation, noise, vibrations and other negative phenomena.

Figure 4 shows main parameters, defining processes of pollutants' formation, liberation and distribution. Modeling and analysis of distribution should take into account all interacting factors and to give proofs for neglectation and/or inclusion into model one or other phenomena, depending on the actual problem examined. Pollution type and its behavior in time are parameters, which are defined approximately well. Specific attention should be paid to emission rate. Some expressions for its evaluation are given below:

Process with clear pollutant formation parameters

$$M = R_1 * T_{\text{process}}$$

where:

$M$  – total emission rate, kg/h;

$R_1$  – liberated amount of gas, fume or vapor, kg/min;

$T_{\text{process}}$  – average time duration for pollutant liberation within one hour, min/h;

Pressure differences inside/outside the pipeline

$$M = k C V \sqrt{\frac{m}{T}} \quad (1)$$

where:

$k$  – coefficient  $k \in (1 \div 2)$ ;

$C$  – coefficient depending on pressure, given in the table below:

Pressure, atm	<2	2	7	17	41
Coefficient C	0,121	0,166	0,182	0,189	0,192

$V$  – inside pipeline diameter, m<sup>3</sup>;

$m$  – molecular weight of gas/vapors

$T$  – temperature in the pipeline, °C

Gas emissions from open spaces (reservoir, spots on the floor)

Nuselt, Prandl and Grashov criteria numbers are applied:

$$Nu = \frac{ud}{D}; \quad Pr = \frac{\nu}{D}; \quad Gr = \frac{ud^3(\rho_0 - \rho_1)}{\nu^2 \rho_1}$$

where:

$d$  – typical dimension, m;

$u$  – liberation velocity from the taken surface, m/s;

$D$  – diffusion coefficient, m<sup>2</sup>/s;

$\nu$  – kinematic viscosity, m<sup>2</sup>/s;

$\rho_0$  – density of air environment, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_1$  – density of air environment, closed to evaporating surface, kg/m<sup>3</sup>;

- Emission rate under laminar flow mode ( $2.10^2 < Gr Pr < 2,3.10^8$ )

$$M = F.A.d^{-1/4} D^{1/2} (C_1 - C_0)^{3/4} [(M_{air} / M_1 - 1)]^{1/4} \text{ g/s} \quad (2)$$

where:

$$F = \begin{cases} 0,334 & \text{when } M_{air} > M_1 \\ 0,184 & \text{when } M_{air} < M_1 \\ 0,224 & \text{for wet vertical surfaces} \end{cases}$$

$A$  – evaporating surface, m<sup>2</sup>;

$M_{air}$  – relative molecular weight of air;

$M_1$  – relative molecular weight of evaporating substance

- Emission rate under turbulent flow mode

$$M = F.A.D^{1/3} (C_1 - C_0)^{4/3} [(M_{air} / M_1 - 1)]^{1/3} \text{ , g/s} \quad (3)$$

where:

$$F = \begin{cases} 150 & \text{when } M_{air} > M_1 \\ 75 & \text{when } M_{air} < M_1 \\ 113 & \text{for wet vertical surfaces} \end{cases}$$

Evaporation rate:

$$M = 7.4(a + 0.017V) (P_2 - P_1) 101.3 \frac{A}{P_B} \quad (4)$$

where:  $M$  is evaporation rate [kg/h]

$V$  – air velocity across the surface, [m/s]

$a$  – coefficient reflecting the influence of air movement, given in [4]

$P_2$  – saturated vapours pressure over the liquid, kPa

$P_1$  – water vapour pressure above the surface, kPa

$A$  – evaporation surface, m<sup>2</sup>

$P_B$  – barometric pressure, kPa.

Gas, vapours and dust particles are distributed in air space due to convection flows of ventilation and turbulent and molecular diffusion. Main equation, which presents process of pollutant with concentration  $C_A$  distribution, is convection diffusion equation:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + u_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + q_c \quad (5)$$

Initial and boundary conditions are given in table 1. They should be particularly specified according to concrete problem.

One simplified expression for concentration  $C_x$  evaluation at distance  $x$  from the source:

$$C_x = C_0 e^{-\frac{u}{D}x} \quad (6)$$

where:

$C_0$  – source concentration, mg/m<sup>3</sup>;

$u$  – air velocity, m/s;

$x$  – distance from source, m;

$D$  – diffusion coefficient, m<sup>2</sup>/s.

Value of  $D$  depends on air flow velocity and on the way of it inflowing and distribution into the premises. In incoming zone (the jet has not been disintegrated) it is calculated under well known formula [Taylor, Laigna etc.]. Outside this zone the following formula should be applied [4]:

$$D = c \varepsilon \frac{1}{3} \ell^{\frac{4}{3}}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (7)$$

where:

$c = 0,25 \pm \Delta$  - coefficient under reliability interval  $\Delta$ ;

$$\ell = \begin{cases} \text{premises height} \\ \text{ventilation instalation diameter} \end{cases}$$

$$\varepsilon = \frac{E_{prem}}{M \tau} \text{ kinetic energy, lost in air mass } M[\text{kg}] \text{ for time } \tau$$

[s].

$$E_{prem.} = \sum E_{jets} + \sum E_{conv.} + \sum E_{moving objects}$$

$$E_{jets} = \frac{1}{2} \rho V u^2$$

$$E_{conv} = \frac{g W_{conv.} H}{1,8 c_p T_0}, \quad W_{conv.} - \text{heat source convection component}$$

$$E_{moving objects} = \frac{1}{2} k A u^2 \rho t$$

Table 1. Boundary conditions

Boundary condition	Flows values	Scalars
Fresh air	Air volume,	T(temperature),

inflow	velocity, pressure	$C_i$ (concentration of impurity $i$ ); Turbulence degree
Exhaust air	Air volume, velocity, pressure	$T$ (температура), $C_i$ (концентрация на вредност $i$ );
Large holes	$P_{\text{пълно}}$	$T$ (temperature), $C_i$ (concentration of impurity $i$ ); Turbulence degree of inflowing air into zone
Walls	$\vec{v} = 0$ outside heat	$T$ (temperature),
Pollution sources	$S_c$ – pollutant emission Heat flow	

### AIR DISTRIBUTION MODELLING

In ventilation objects with great volumes in respect to air flows behaviour following types of zones exist:

- Main air flow;
- Free or semi-restricted jets, generated by air supply equipments;
- Re-circulation zones (рециркуляционни зони);
- Stand still zones.

Mathematical modelling [5,3] can help in zone evaluation and definition as well as transition between modes – fully turbulent, transitional, laminar. Classical model in mechanics, presenting turbulent air flow, consists of mass and momentum conservation (Navie-Stocks):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial (\rho u_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (8,9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] + \rho \beta \delta_{i2} (T - T_{ref})$$

$$\vec{u} = u(x_1, x_2, x_3; t)$$

where:

$$\rho = \rho(x_1, x_2, x_3; t)$$

Indexes  $i$  and  $j$  are used, instead of traditional  $x, y, z$  in order to transfer easily mathematical model into its numerical analogue.

Simplified turbulent model can be applied, namely:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \beta \delta_{i2} (T - T_{ref}) \quad (10)$$

Most widely applied turbulent models to solve Navie-Stocks equations are  $k - \varepsilon$  and  $k - \omega$ . Turbulent viscosity is presented in the way:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{for } k - \varepsilon \text{ model and } \mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega} \quad \text{for } k - \omega \text{ model.}$$

Turbulent model application is obligatory due to the need to model different turbulent modes [1,4] and also transition from one mode in another.  $k - \varepsilon$  model can create numerical problems in zones with weak turbulence. The reason is that

when  $k \rightarrow 0$  expression  $\frac{\varepsilon^2}{k}$  representing turbulent diffusion in  $\varepsilon$  equation tent to infinity.  $\varepsilon$  equation is:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (11)$$

Such kind of problem doesn't exist in  $k - \omega$  model:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \left( \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\omega}{k} (C_{\omega 1} P_k - C_{\omega 2} \rho \omega)$$

In zones with weak turbulence diffusion term tent to 0 and no numerical problems cause. Special attention in airflows distribution in large volumes should be paid to air jets. They predefine ventilation measures effectiveness and ventilation strategy [1].

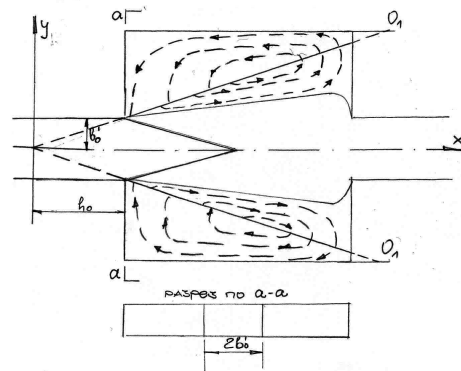


Figure 5. Free jet elements

Air jets are formed as a result of directed air inflow through ventilation devices. In case no influence of walls, ceilings and other jets exist, the jet can be considered as a free jet. Very often its identity depends on reverse flows and other currents in ventilated space with different temperature, which lead to origination and action of Archimedes forces. Free jets are classified according to ventilation outlet to: compact, linear, radial, swirling. Four zones are observed in jet development and existence (figure 5)

- Zone 1 (jet kernel) – short zone ( $2 \div 6d$ ). Centerline velocity remains nearly equal to supply velocity;
- Zone 2 (transition zone) – Depend on diffuser type. For a compact jets it is from 8 to 10d. Maximal velocity may vary inversely with the square root of the distance from the outlet;
- Zone 3 (fully established turbulence). Its length depends on the air jet shape, type and size of supply diffuser, initial velocity, turbulence characteristics of ambient air. It has major engineering importance since this is the place where jet enters the occupied region;
- Zone 4 (terminal/decay zone) or the place where jet loses its identity.

Expressions below can be used to evaluate jet velocity in arbitrary place in jet. Diffuser type is assumed rectangular with dimensions  $2L \times 2B$ . In point with coordinates  $x, y, z$  against jet center, velocity is defined under the following expression:

$$u(x, y, z) = \frac{u_0}{2} \sqrt{\left( \operatorname{erf} \frac{L-y}{cx} + \operatorname{erf} \frac{L+y}{cx} \right) \left( \operatorname{erf} \frac{B-z}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B+z}{cx} \right)} \quad (12)$$

Centerline velocity ( $y=0, z=0$ ) is:

$$u(x) = u_0 \sqrt{\operatorname{erf} \frac{L}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B}{cx}} \quad (13)$$

Above expressions are valid for zones 1 to 3.

In case diffusion type is rectangular with great length ( $L \rightarrow \infty$ ) and width  $2B$  (linear diffuser) velocity is evaluated under the expression:

$$u(x, y, z) = \frac{u_0}{2} \sqrt{\operatorname{erf} \frac{B-z}{cx} + \operatorname{erf} \frac{B+z}{cx}} \quad (14)$$

while on the centerline it is:

$$u(x) = u_0 \sqrt{\operatorname{erf} \frac{B}{cx}} \quad (15)$$

Centerline velocity for radial diffuser type is [4]:

$$\frac{u(x)}{u_0} = 1 - \exp\left(-\frac{d^2}{4c^2x^2}\right) \quad (16)$$

Known expressions for flows formation in large volume premises [7] are given below:

- In case Re number, related to free jet initial outlet area is in range 1900-2500, only turbulent jet is formed in the premises, initiated from outlet diffuser;
- In case Re number is less than 1900 only laminar or laminar-turbulent jets can be presented in the premises, last of them forming when  $Re \cong 1800$ .

## CONCLUSION

Air flows and pollutant distribution can be made by applying the following approaches:

- Experimental measurements and calculations;
- Mathematical and computer modeling;
- Combination of the above.

Mathematical and computer modeling include:

- Mathematical and physical model description (equations, expressions, coefficients);
- Equations' transitions into computer model;
- Numerical solution of discrete model.

Mathematical and computer modeling [3,6] shortened the path for investigation of a given problems to practical results. This approach is extremely useful in the following cases:

- Lack of data and possibility for real measurements;
- Complex problem – in our case different in number and structure interrelated zones;
- Known initial and boundary conditions – supply and exhaust air volumes;
- Need to optimize ventilation parameters in order to choose more effective scheme for ventilation.

Additional advantage of simulation approaches is that it can give hints where and what to measure so as to obtain close to reality model thus leading to realistic models' results.

Mathematical models (general and simplified), presented in this paper will serve as a basis for velocity field evaluation and furthermore – to important fro ventilation point of view zones in ventilated premises.

*More accurately definition of models' parameters, experiments on models' adequacy, applicable mathematical models to transform into discrete analogue, the results themselves are the object of following works. .*

## REFERENCES

- Abramovic, G.N., 1960, 1984, Teorija turbulentnih struj, Fizmatizdat, Moskow.
- Elterman V.M, 1980, Provetrivanie himiceskih predprijatii, Himija, Moskow.
- Allard F et.al. 1986, Fundamentals of multizone airflow model – COMIS, Coventry, Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC),.
- Industrial Ventilation – design guide book, 2001, edited by H. Goodfellow, E. Tahtii, Academic press, Hardcourt Science and Technology Company, , p. 1519.
- Hanjalic K., 1994, Advance turbulence enclosure models: a view of current status and future prospects, Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 15, pp. 178-203,.
- Davidson I., 1989, Ventilation by displacement in a three dimensional room: A numerical study, Build. Environ., vol. 24, pp. 363 – 372,.
- Voronin V.N., 1951, Osnovi aerogazodinamiki, .Ugletehizdat, Moskva