



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

# ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА НА ФЛУИДИТЕ

**проф. д-р ИВАН. АНТОНОВ**

<http://mfantonov.com>

# ЛИТЕРАТУРА:



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

*ИВАН. С. АНТОНОВ*

**ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА  
НА ФЛУИДИТЕ**

*ВТОРО ПРЕРАБОТЕНО  
И ДОПЪЛНЕНО ИЗДАНИЕ*

СОФИЯ  
2016

## **10) ТУРБУЛЕНТНИ ЗАВЪРТЕНИ СТРУИ. ОСОБЕНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЕ. ВЪЗНИКВАНЕ НА ПРИОСЕВА ЦИРКУЛАЦИОННА ЗОНА. ПРОСТРАНСТВЕНИ СТРУЙНИ ТЕЧЕНИЯ**

### **Турбулентни завъртени струи. Особености и приложение. Възникване на приосева циркуляционна зона. Пространствени струйни течения**

Завъртените турбулентни струи намират голямо приложение в съвременните топлоагрегати, горивни камери и апарати в химическата и хранително-вкусовата промишленост, пречиствателните съоръжения и др. Определящо за широкото им приложение в практиката е обстоятелството, че завъртането на течението е най-добрият начин за активизация на процесите, свързани с топло- и масообмена, както и с центрофугалния ефект.

Характерна особеност при тези течения е пространственото разположение на вектора на скоростта (4.1) и наличието на симетрия относно оста на течението. Уравненията, описващи движението на завъртените турбулентни струи, са дадени в т. 4.2 (уравн. 4.8-4.13), а интегралните условия - в т.4.3. Наличието на завъртаща (тангенциална) скоростна компонента  $w$  води до възникване на надлъжен и напречен градиент на налягането, като минималните му стойности са по оста на течението. Това се явява като допълнителен, вторичен от завъртането фактор, способстващ за интензификация на смесителните процеси.

Завъртяното течение се характеризира с число на подобие  $S$  - степен на въртене. Съгласно Л.Г.Лойцянский [22] това число на подобие се представя чрез отношение на момента на количество на движение към произведението на количеството на движение и характерен за течението линеен размер:

$$4.70 \quad S = \frac{M}{I \cdot r}, \text{ където } I \text{ и } M \text{ се определят по (4.18) и (4.23), } r - \text{ характерен радиус; за началната степен на въртене}$$

радиусът на дюзата е  $r = r_0$ .

Понякога, като се пренебрегнат налягането и турбулентните тангенциални напрежения, се използва една чисто кинематическа зависимост за степента на въртене:

$$4.71. S' = \frac{W_m}{U_m},$$

където  $W_m$  и  $U_m$  са максималните за дадено сечение стойности на тангенциалната и осовата компонента на скоростта. Между двете зависимости съществува връзката [15]

$$4.72. S = \frac{S'/2}{1 + (S'/2)^2},$$

валидна до  $S' < 0,4$  и сравнително по-точната в диапазона до  $S' = 1$

$$4.73. S = \frac{S'/2}{1 + (S'/2)}$$

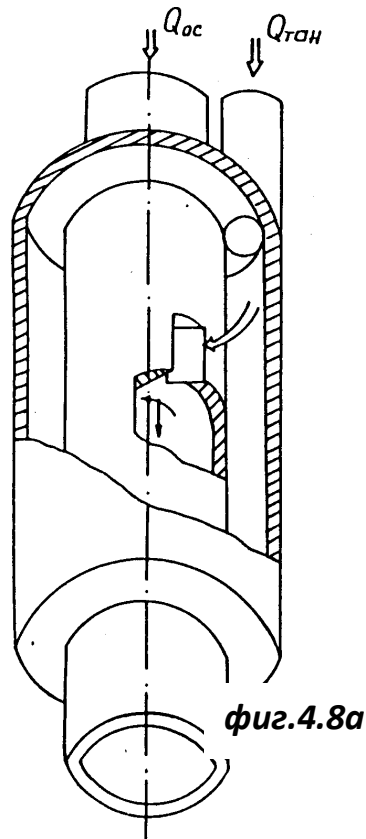
**Формиране на завъртяното течение.** Завъртените течения са широко разпространени в природата - циклоните, торнадото, смерчовете и вихрушките в атмосферата, водовъртежите в реките и водните басейни, огнените смерчове, възникващи при горски и масови пожари в населените места, и много други.

В инженерната практика завъртените течения се реализират по следните начини:

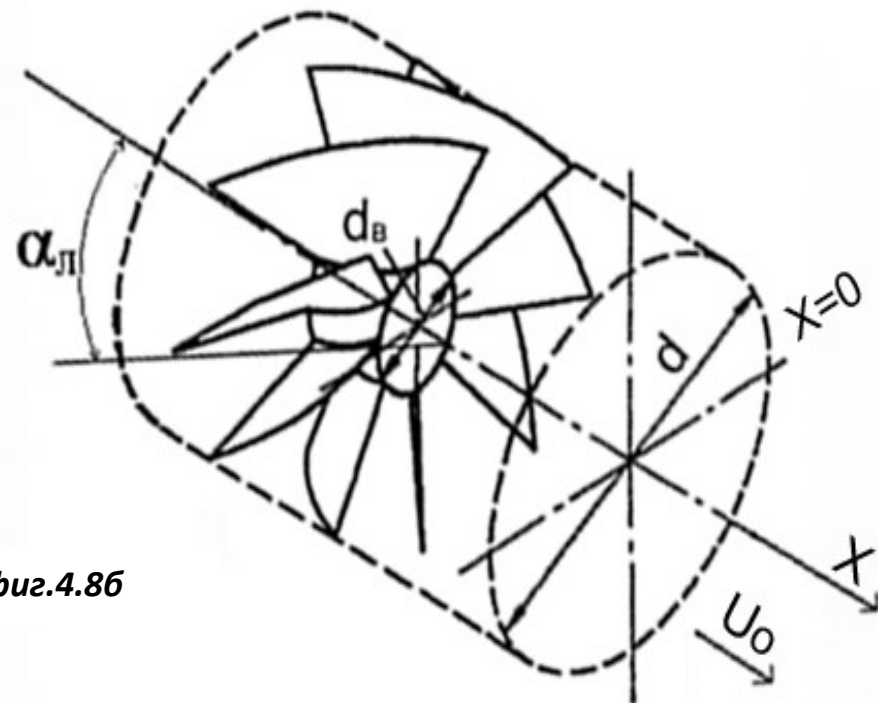
- 1) генератор на въртене с осево и тангенциално подаване на флуида (фиг.4.8а);

- 2) чрез лопатъчен направляващ апарат (фиг.4.8б);
- 3) непосредствено завъртане чрез въртяща се тръба или диск (фиг. 4.8в);

Особено внимание заслужава първият начин на генериране на завъртяно течение. При него с промяна на отношението на осевия и тангенциално подавания флуид може да се постигне непрекъснато изменение на интензивността на въртене, респ. на степента на въртене  $S$ . Завъртащите лопатъчни апарати са съставени от



фиг.4.8а

<http://m>

фиг.4.8б

лопатки, фиксирани на определен ъгъл на поставяне спрямо оста на основното течение. Лопатъчният апарат е неподвижен и при преминаване на течението през него се получава завъртане, което е функция на наклона на лопатките.

Съгласно [15] степента на въртене се определя по

$$4.74. S = \frac{2}{3} \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{d_g}{d}\right)^3\right]}{\left[1 - \left(\frac{d_g}{d}\right)^2\right] \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\pi}},$$

където:  $d_g$  и  $d$  са диаметрите на втулката и на лопатъчното колело;  $\alpha_{\pi}$  - наклон на лопатките към оста.

За сумарната степен на въртене при използване на система от коаксиални лопатъчни завъртащи апарати [35] степента на въртене се пресмята със зависимостта

$$4.75. S = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \rho \cdot u_{oi}^2 \cdot (r_{i+1}^3 - r_i^3) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\pi,i}}{\sum_{i=1}^k (\rho \cdot u_{oi}^2 + p_{cm}) \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2)^{3/2}},$$

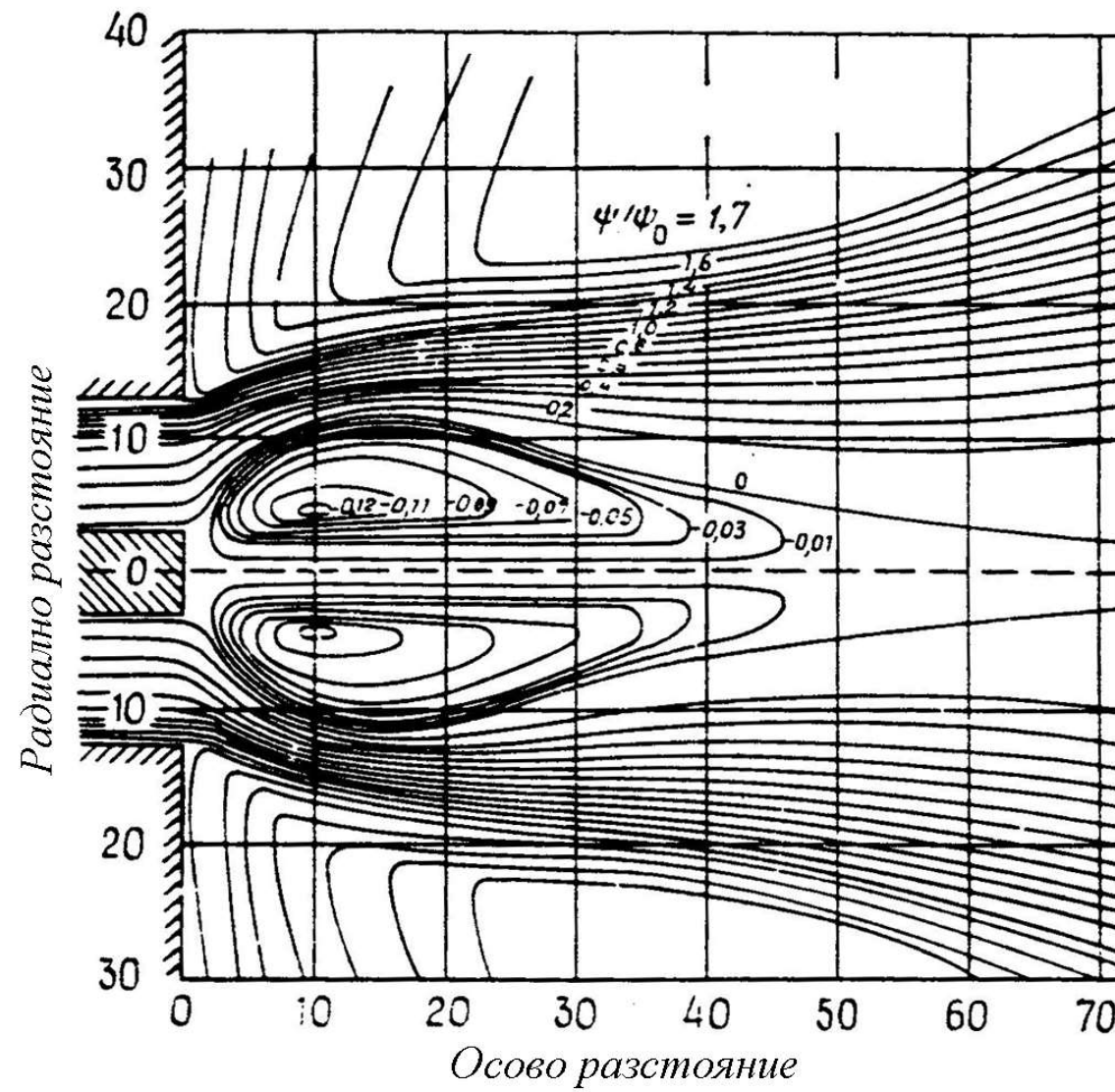
където  $r_i$ ,  $r_{i+1}$  са диаметрите на съответното лопатъчно колело,  $u_{oi}$  - осевата скорост в него,  $\alpha_{\pi,i}$  - наклон на лопатките.

Завъртането с лопатъчен апарат най-често се прилага в горивните камери, газотурбинни двигатели и др.

**Основните ефекти при завъртените струи (течения) се свеждат до следното:** Нарастване на широчината на струйния граничен слой, на интензивността на обменните процеси и по-бързото затихване на скоростта при увеличаване на степента на въртене  $S$ . Възниква радиален градиент на налягането, който при много малки степени на въртене ( $S < 0,2$ ) може да се пренебрегне. При по-високи степени на въртене ( $S > 0,6$ ) градиентът на налягане нараства в осево и радиално направление ( $\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho \cdot w^2}{r}$ ), пропорционални на втората степен на завъртащата тангенциална скоростна компонента). Вследствие на центробежните сили и разреждането по оста на течението възниква *приосева циркулационна зона* (фиг.4.9).

Върху възникването на циркулационната зона освен степента на въртене оказват влияние геометричните параметри на завъртащия апарат, размерите на смесителната камера, видът на скоростното разпределение на изхода от завъртащия апарат и пр. В горивната техника едно от най-важните и полезни качества на завъртените течения е съществуването на циркулационна зона. Тя играе съществена роля като стабилизатор на горивния процес, създава обратен ток с продукти от горенето и област от течението, в която понижената му скорост се изравнява със скоростта на разпространение на фронта на пламъка. Това води до скъсяване на разстоянието до зоната на стабилизирано горене и на дължината на факела на пламъка. Освен това фронтът на пламъка може да се управлява с регулиране на разширението му чрез въздействие върху степента на въртене.

В заключение може да се обобщи, че завъртането се използва преди всичко за управление ъгъла на разширение на течението и затихването на максималната стойност на осевата скоростна компонента, за създаване, ако това изисква даден технологичен процес, на приосева циркулационна зона. При разпръскващите устройства чрез управление на степента на въртене се формира диспергирана струя с определени параметри.



фиг.4.9

**Скоростно поле при завъртените турбулентни струи.** Наличието на три компоненти на скоростта и на налягане прави скоростното поле на завъртените струи твърде комплицирано и, разбира се, интересно от теоретична гледна точка. Съгласно опитните изследвания (собствени и известни от литературата) [10, 15, 24, 25, 26, 35, 44,48-52] затихването на максималните стойности на осевата и тангенциалната скоростна компонента и на налягането се подчиняват на зависимости от вида:

$$4.76. \quad \overline{U}_m = \frac{U_m}{U_{m0}} \approx \bar{x}^{-1} \quad \overline{W}_m = \frac{W_m}{W_{m0}} \approx \bar{x}^{-2} \quad \overline{p} = \frac{p_\infty - p_{\min}}{p_\infty - p_{\min,0}} \approx \bar{x}^{-4},$$

където:  $\bar{x} = \frac{x}{r_0}$ ,  $r_0$  - начален радиус на струята; в началното сечение съществува неравномерно разпределение на скоростите и налягането, което налага при обезразмеряване на параметрите по дължина на струята да се използват максималните им стойности -  $U_{m0}$ ,  $W_{m0}$  и  $p_{\min,0}$ . От (4.76) следва, че тангенциалната скоростна компонента  $W$  затихва два пъти по-бързо от осевата, а налягането – четири пъти. Това означава затихване и на въртенето твърде близко до изходящото сечение.

Безразмерното напречно разпределение на скоростните компоненти и налягането съгласно опитни резултати на J.M.Chigier и A.Chervinsky [49], се описва с изразите:

$$4.77. \quad \begin{aligned} \frac{U}{U_m} &= \exp(-K_u \cdot \xi^2) & \frac{W}{W_m} &= C \cdot \xi + D \cdot \xi^2 + E \cdot \xi^3 \\ \frac{V}{V_m} &= F \cdot \xi + G \cdot \xi^2 & \frac{p_\infty - p}{p_\infty - p_{\min}} &= \exp(-K_p \cdot \xi^2) \end{aligned},$$

където:  $\xi = \frac{x}{r_0}$  (по [50])  $\xi = \frac{x+a}{r_0}$  - полюс на струята, приет за равен на  $4,6 \cdot r_0$ ); константите в горните зависимости

като функция на степента на въртене  $S$  са дадени в табл.4.5.

Таблица 4.5

| $S$   | $C$    | $D$     | $F$      |
|-------|--------|---------|----------|
| 0,066 | 7,700  | 71,500  | -542,000 |
| 0,134 | 10,700 | 20,000  | -326,000 |
| 0,234 | 18,100 | -98,800 | 138,000  |
| 0,416 | 15,100 | -67,200 | 75,400   |
| 0,600 | 15,100 | -67,200 | 75,400   |
| 0,640 | 15,100 | -67,200 | 75,400   |

$K_u = \frac{92}{1+6.S}$ ;  $K_p = \frac{150}{1+8.S}$ ;  $F = \frac{2.S}{r}$ ;  $G = -\frac{S}{r^2}$ , параметрите  $s$  и  $r$  в зависимост от  $S$  са дадени в табл.4.6.

Таблица 4.6.

| $S$ | 0,0660 | 0,134 | 0,234 | 0,416 | 0,6 – 0,64 |
|-----|--------|-------|-------|-------|------------|
| $r$ | 0,0750 | 0,090 | 0,125 | 0,120 | 0,150      |
| $s$ | 0,0085 | 0,009 | 0,011 | 0,011 | 0,013      |

Важни характеристики на завъртяната струя са ежекционната ѝ способност, представена от коефициента на ежекция  $k_{еж}$  и ъгъла на разширение на струята  $\alpha$ . Съгласно [15,50] те се представят с емпиричните зависимости:

$$4.78 \quad k_{еж} = \frac{m}{\dot{m}_0} = \frac{K_l x}{2r_0} \quad \alpha_{0,5} = 4,8 + 14.S,$$

където:  $K_l = 0,32 + 0,8.S$ ,  $\alpha = \arctg\left(\frac{r_{0,5}}{x}\right)$ ,  $r_{0,5}$  - координатата на точката, в която  $u = 0,5.U_m$ .

Съгласно [24] ежекционното действие на завъртяната струя се характеризира с коефициента на ежекция за ъгъла на разширението ѝ  $\alpha$  като да се използват зависимостите:

$$4.79 \quad \bar{Q}_{еж} = \frac{2A_2 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{2A_1}} \bar{x} - 1,$$

където  $\bar{Q}_{еж} = Q_{еж}/Q_0$ ,  $Q_0$  - начален дебит;

$$4.80 \quad \alpha = \arctg(12,6 + 40S_0)$$

На фиг.4.10 е показано разпределението на осевата скоростна компонента  $u$  за напречно сечение, отстоящо от началото на  $x = 8,2.r_0$ . От анализа на това разпределение и от собствени опитни изследвания може в зависимост от степента на въртене  $S$  да се направи следната класификация на завъртените струи:

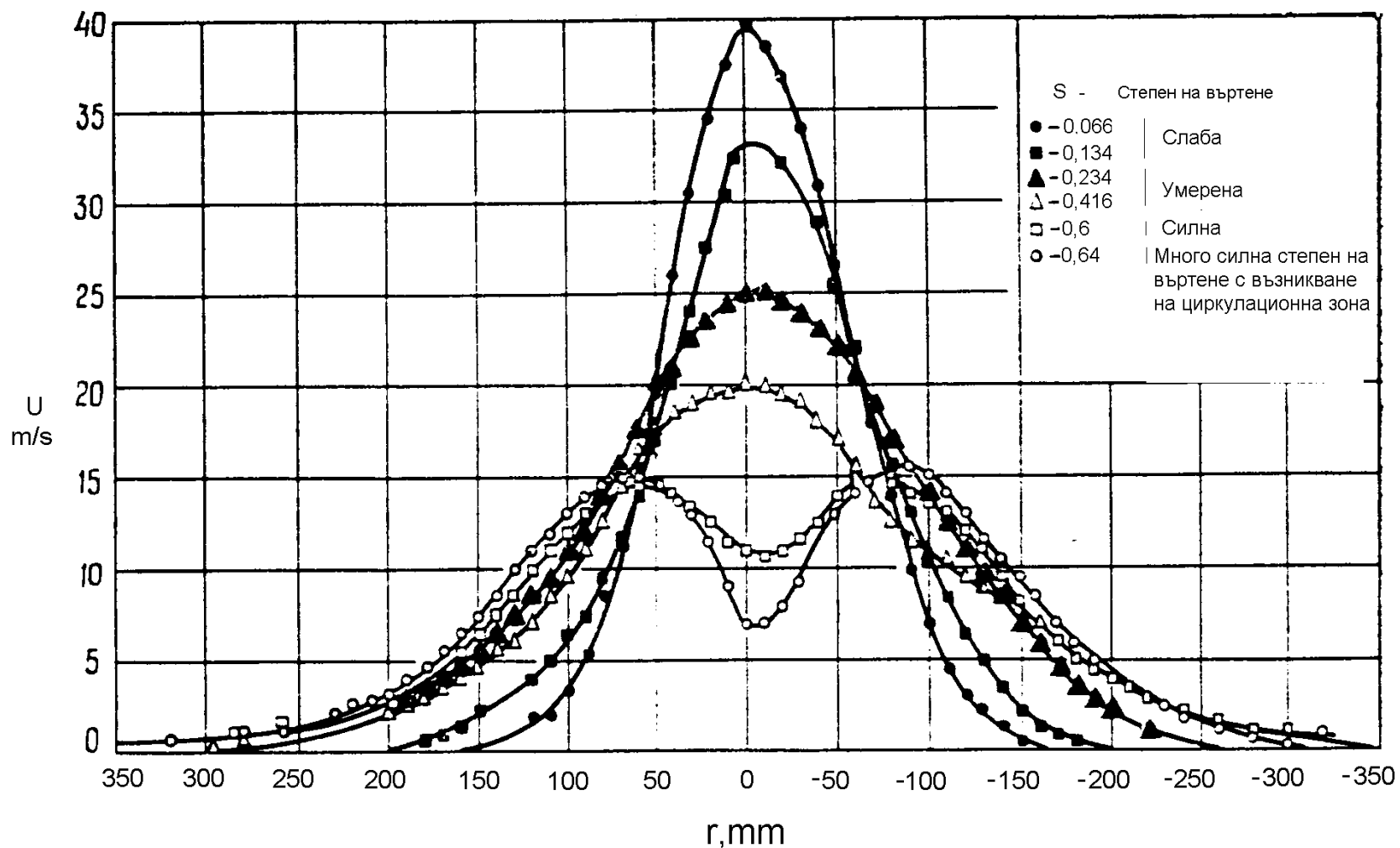
- струи с ниска степен на въртене –  $0 < S < 0,2$

- струи с умерена степен на въртене –  $0,2 < S < 0,6$
- струи с висока степен на въртене –  $S \geq 0,6$

Характерно при високите степени на въртене ( $S \geq 0,64$ ) е възникването на приосева циркулационна зона.

Турбулентните характеристики при слабо завъртяна турбулентна струя ( $S = 0,3$ ) по [15] са дадени на фиг.4.11. Очевидно е голямото различие в характера на разпределението на отделните съставлящи на тензора на допълнителните турбулентни напрежения.

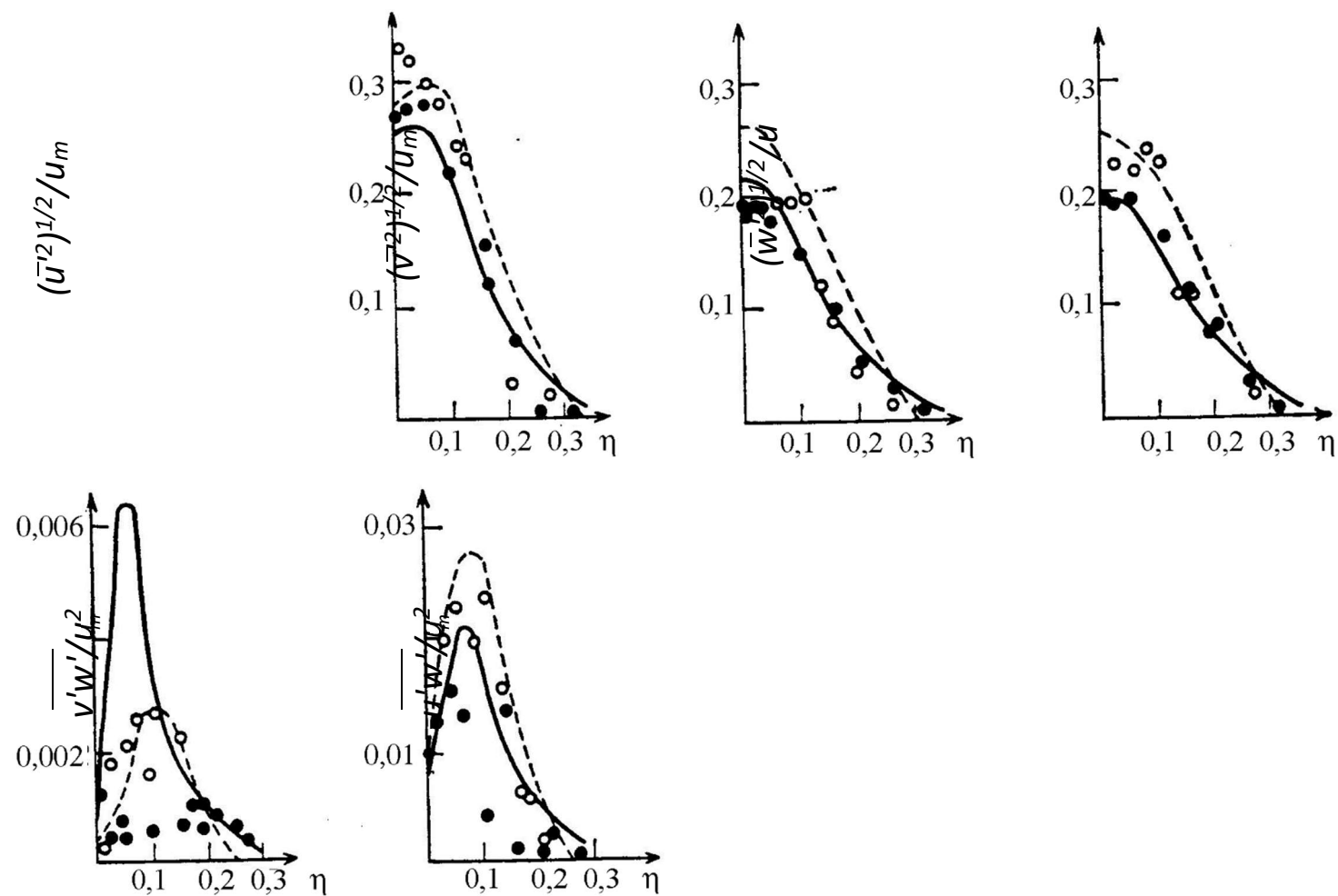
Решаването на завъртените турбулентни струи може да се осъществи числено на основата на интегрален метод или чрез метода на крайните разлики, най-често като се използва  $k - \varepsilon$  – модел за затваряне на системата уравнения за движение.



Радиално разпределение на осевата скоростна компонента  $U$  за  $x/r_0 = 8,2$

фиг.4.10

**Огнени смерчове.** Огнените смерчове (вихровите движения при пожарите) възникват при горски и други крупни пожари. Големите пламъци създават топлинни конвективни стълбове от възходящ газ. При отсъствие на въртеливо движение стълбът на възходящото течение се захранва от постъпващ хоризонтално въздух. Захранването с въздух се дължи на разликата в налягане между горящия стълб и околната въздушна среда. Ако на възходящото горящо течение действа само този постъпващ въздух и при наличие на високата турбулентна дифузия на топлина към околната среда, би трябвало да се очаква бързо затихване на вертикалната скорост на газовете и ограничаване на горящия стълб по височина. На практика се получава съвсем друго: наличието на циркуляционно течение в околната среда ( $\Gamma \neq 0$ ) завърта огнения стълб и създава потенциално възходящо ядро. Това ядро от своя страна води до намаляване на турбулентната дифузия, създавайки разделителна повърхност по външната си граница, възпрепятства проникване на въздух във вътрешността му. Формира се тънък стълб от въртящ се силно нагрят газ. Вследствие на наложеното външно циркуляционно течение в непосредствена близост до земната повърхност в огнения стълб възниква голям напречен градиент на налягане. Това води до постъпване в него в радиално направление на свеж въздух и често пъти на горими продукти, което подхранва горивния процес.



Плътните линии и точки отговарят на резултати от пресмятане и експеримент за  $x/r_o = 12$ , а прекъснатите криви и празните точки за  $x/r_o = 24$ , съгласно [15]

фиг.4.11

По тази причина и при наличието на упоменатото по-горе потенциално възходящо ядро осевите (вертикалните) скорости имат много по-големи стойности в сравнение с обикновените конвективни течения. Тези два фактора възпрепятстват образуване на вътрешни циркуляционни зони, респ. обратни течения в близост до оста. Това запазва устойчивостта и далекобойността на възходящия огнен стълб. Наличието на радиален градиент на скоростта и полето на центробежните сили води до една псевдо “ламинаризация” на турбулентния пламък, удължавайки го много.

Въпросите относно огнения смерч са сравнително слабо изучени и заслужават определен научен интерес при изследване на горските и масовите пожари, при катастрофи от екологично или технологично естество, каквито застрашават всяка една високоразвита цивилизация.

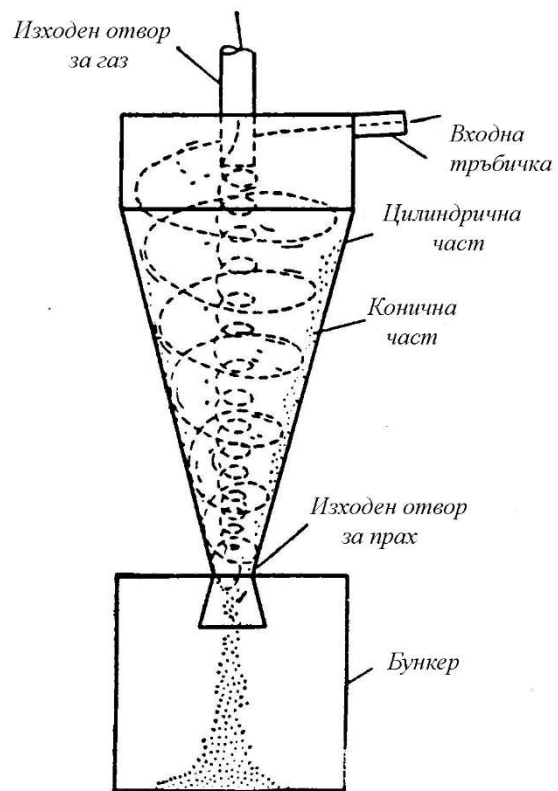
**Циклонни сепаратори.** Един от способите за разделяне на смесите е приложението на центробежния принцип в т.нар. циклонни сепаратори. Идеята за подобно разделяне принадлежи на Делевал (1877г.), когато предлага отделянето на маслото от млякото да става във въртяща се "камбана" с честота 6000об./мин. Първият патент съгласно [15] за събиране на прах е от 1886г.- Morse, O. M., USPatent №39219, Knickerboker Co., Jackson, Mississippi, 1886; Prandtl, L., German Patent №1343360, MAN, Nurnberg, 1901. Циклоните намират широко промишлено приложение за разделяне на хетерогенни смеси (твърди включения в течна или газова носеща среда), включително и за течни смеси, съдържащи повече от две взаимно неразтворими течности във вид на нестабилни

емулсии. В някои случаи циклонните камери се използват за изгаряне на нискокалорични горива, за пълното изгаряне на които е необходимо по-голямо време за пребиваване.

Принципното устройство на циклонен сепаратор е показано на фиг.4.12.

Хетерогенната смес (напр. газ, съдържащ твърди примеси) постъпва тангенциално през входния отвор в цилиндричната част на камерата с висока скорост. Газът, съдържащ твърди примеси (прах), се движи по спирала надолу към коничната част. Завъртяното течение се развива в коничната част от сепаратора, където става и отделянето на частиците примеси под действие на центробежните сили. Те се придвижват по коничните повърхнини и през изходния отвор за прах постъпват в бункера. При движението си надолу към дъното на коничната част газовото течение се отклонява към оста на сепаратора и по една възходяща спирала се насочва към горната му част, където е разположен изходящият отвор.

Изходящият отвор за газ е разположен в горната цилиндрична част на циклона и е частично вкаран вътре в нея.



Циклонна камера - процеси на движение

<http://mfantonov.com/>

Препоръчителните размери съгласно [15] (фиг.4.13), отнесени към  $D_0$ , са:

$$\overline{D}_e = 0,41 \div 0,75; \quad \overline{D}_D = 0,28 \div 0,575; \quad \overline{a} = 0,2 \div 0,375; \quad \overline{b} = 0,5 \div 0,75$$

$$\overline{c} = 1,0 \div 2,0; \quad \overline{h} = 0,41 \div 0,875; \quad \overline{L} = 2,0 \div 4,0; \quad \overline{H} = 1,65 \div 3,0;$$

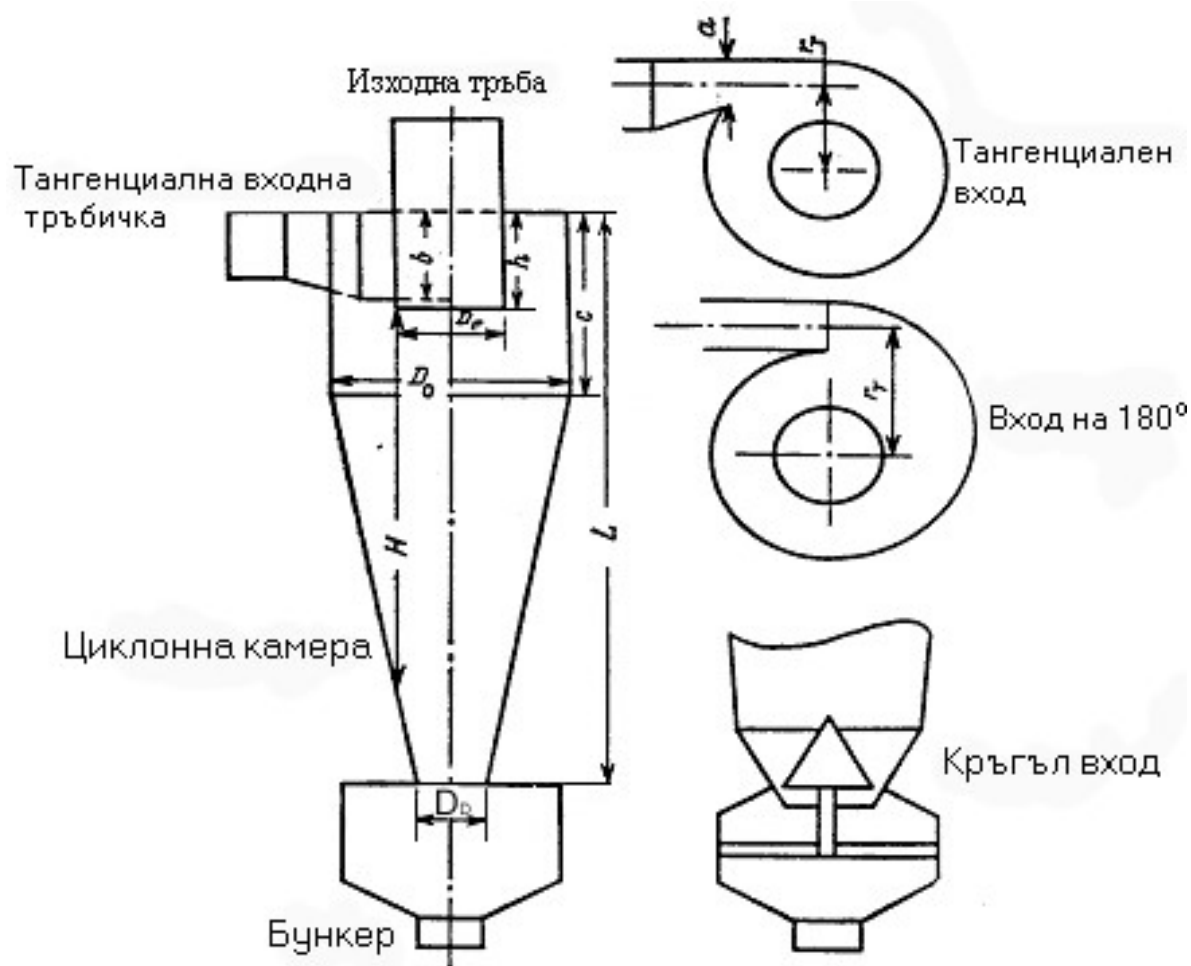
$$\overline{r}_T = 0,375 \div 0,68.$$

Високите стойности се отнасят до апарати с по-голяма производителност.

Определящ параметър за течението е степента на въртене  $S$ , която е в границите от  $2 \div 4,5$ . Като се приеме равномерен скоростен профил за входящото сечение на сместа, при изотермични условия съгласно [15] за степента на въртене следва

$$4.81. \quad S = \frac{\pi \cdot D_e \cdot D_0}{4 \cdot A_T},$$

където:  $D_e$  и  $D_0$  - диаметри на изходящата тръба за газовете и на основната част на циклонната камера,  $A_T$  - площ на тангенциалната входна тръба.



Геометрични параметри на циклонен сепаратор

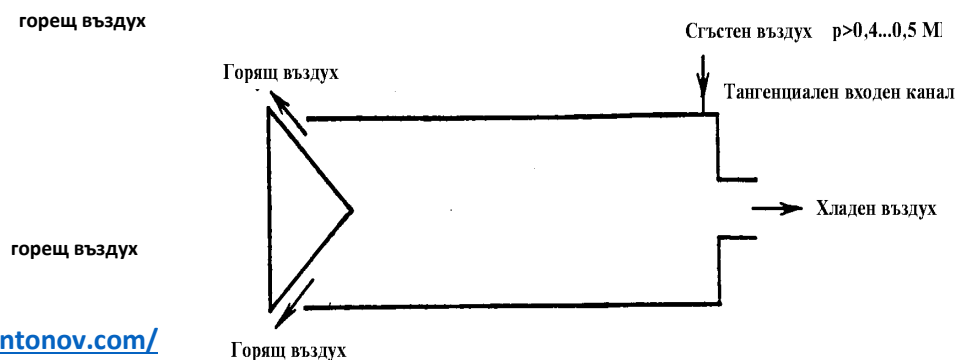
Фиг.4.13

Циклонните сепаратори имат следните особености [15]:

- продължителен престой на сместа в камерата;
- твърдите или течни частици могат да бъдат отделени или приведени в състояние на "витаене" вследствие на т. нар. "изкуствена гравитация", създадена от центробежното силово поле в резултат от завъртането на течението; възникват циркулационни зони; повишава се степента на турбулентност (върху тези параметри на течението може да се влияе чрез формата и разположението на входните тангенциални отвори).
- в близост до стените на камерата възниква граничен слой с голяма дебелина, който намалява влиянието на центробежните сили;
- циркулационна тороидална зона възниква в близост до изходящата тръба за газовете; зоната е и с повишена турбулентност

Тъй като в някои специални дисциплини въпросът за циклонните сепаратори е разгледан по-подробно, тук са приведени само основни понятия и принцип на действие.

**Вихрови камери в хладилната техника (тръба на Ранк-Хилш).** Вихровите камери от вида на тръбата на Ранк-Хилш намират приложение като хладилни съоръжения (фиг.4.14 ).



фиг. 4.14

<http://mfantonov.com/>

Схема на тръба на Ранк-Хилш с тангенциален входен канал

Сгъстен въздух със скорост  $w = 150 - 200 \text{ m/s}$  ( $M > 0,5$ ) се подава чрез редица тангенциални отвори, разположени в края на тръбата. Вследствие на адиабатното свиване и разширение на турбулентните вихри в поле на центробежни сили възниква неадиабатно разпределение на температурата и една променяща се в радиално направление осева скорост. Това довежда до енергийно разделяне на газа. В областта около оста на тръбата се получава газ с ниска температура, а в периферията – течение на горещ газ. Последният се извежда през пръстеновиден отвор от срещуположния край на тръбата. Силно охладеният газ в приосевата зона напуска тръбата в сечението, където се подава сгъстеният газ или съосно (спътно) на горещия газ.

На фиг.4.15 по [15] е показано разпределението на относителната температурна разлика  $T - T_e$  в напречните сечения на вихровата тръба ( $T_e$  - температурата на входящия газ).

Възникналото течение може да се реши, като в уравнението за пренос на енергия се пренебрегне конвективният член. Получава се едно условие за равновесие на топлопроводността и вискозната дисипация от вида[15]:

- за ламинарен режим

$$4.82. \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left( \alpha \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \mu \left( \frac{dw}{dr} - \frac{w}{r} \right)^2 = 0$$

- за турбулентен режим

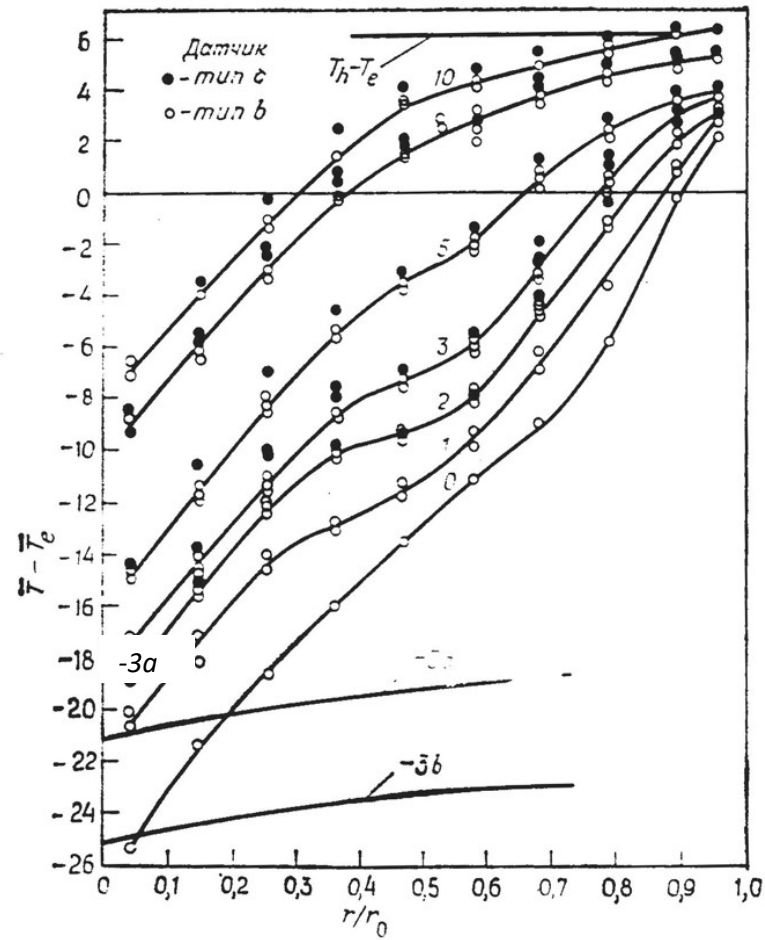
$$4.83. \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left( \alpha_t \cdot r \cdot \left( \frac{dT}{dr} - \frac{dT_{cp}}{dr} \right) \right) + \mu_t \left( \frac{dw}{dr} - \frac{w}{r} \right)^2 = 0,$$

където:  $\alpha$  и  $\mu$  - топлопроводност и динамичен вискозитет;  $\alpha_t$  и  $\mu_t$  - турбулентна топлопроводност и вискозитет;

$\frac{dT_{cp}}{dr} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dr}$ ;  $p$  - осреднено по време налягане;  $k$  - показател на адиабатата. Най-често течението е

турбулентно и решенията се правят с използване на (4.83).

<http://mfantonov.com/>



**фиг.4.15.** Кривите 3а и 3б са получени в тръбата, през която изтича хладният въздух. Останалите криви дават пълните температури в шест напречни сечения на камерата. В централната област минималната температура е разположена съвсем близо до тангенциалния входен канал, което показва целесъобразността за извеждане на студения въздух в този край на устройството.

В дисертацията на Х.Х.Бруун (цит. по [15]) се предлага определянето на температурата в тръбата да се направи при въвеждане и на пулсационните съставлящи от тензора на Рейнолдсовите напрежения:

$$4.84. \rho.c_p \cdot \left( u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{v}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r^2 \cdot \rho \cdot \overline{w'v'}) - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot c_p \cdot \rho \cdot \overline{v'T'}),$$

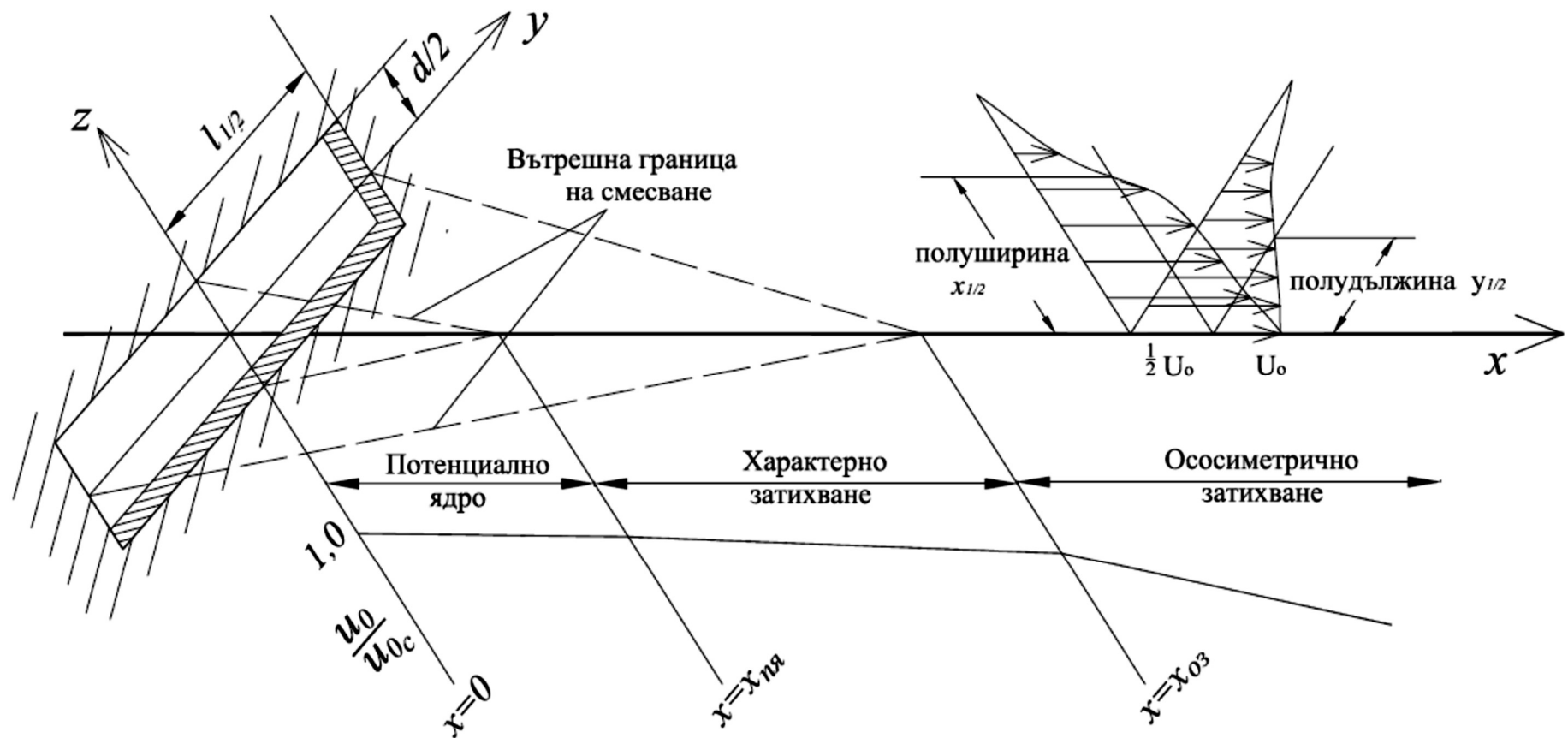
$$\text{където: } \overline{\rho \cdot w'v'} = \mu_t \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right); \quad \rho \cdot c_p \cdot \overline{v'T'} = -k_t \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial T_{cp}}{\partial p} \right)$$

Това уравнение дава възможност да се оцени влиянието на двата члена вдясно върху ефекта на разделяне на газовата среда в тръбата.

От известните анализи в литературата следва изводът, че основна роля в енергийното разделяне на газа играе турбулентната топлопроводност, а процесът на разделяне се предизвиква, както е упоменато по-горе от адиабатното свиване и разширение на турбулентните вихри в центробежно силово поле [15].

**Пространствени струйни течения.** Съществуват няколко възможности за възникване на тримерни струйни течения: при изтичане от тримерни дюзи (правоъгълни, елиптични, звездовидни и пр.), при взаимодействие на струи, изтичащи от система от дюзи с успоредни или под ъгъл разположени оси, при вдухване на струя под ъгъл в дадено ограничено или неограничено течение. В първите два случая възникват тримерни коаксиални струи.

Течението на турбулентна струя, изтичаща от една тримерна дюза, съгласно [43, 61, 62, 63] се дели на четири характерни области (фиг.4.16) :



фиг.4.16

- потенциално ядро - размесването с околната среда не е обхванало цялата струя, протича във външния граничен слой;
- участък с "характерно затихване" - затихването на осевата скоростна компонента зависи от формата на дюзата; скоростните профили по минималния размер на струята са автомоделни (афинни), а по максималния не са автомоделни;
- третата област е на "ососиметричното затихване" – максималната осева скорост затихва както при ососиметрична струя ( $U_m \approx x^{-1}$ ); течението се стреми към ососиметрично;
- четвъртата област е на оформеното вече ососиметрично течение.

Методите на изследване се свеждат до численото моделиране на течението по метода на крайните разлики, най-често при използване на  $k - \varepsilon$  модел на турбулентност.

Към пространствените струи се отнасят и теченията, формирани при напречно вдухване на струя в тримерно течение [16, 41, 43, 46, 54 и др.].