



Д-р инж. Пламен Йорданов Пенчев



- **Интензификация на топлообмена чрез комбиниране на тръби с дълбоко валцовани турбулизатори и спирални ленти**

Генерации топлообменни технологии



- Първа генерация
- Втора генерация
- Трета генерация
-
- Четвърта генерация
-

Гладка тръба (без оребряване)
Гладки ребра
Надлъжни завихрители върху
ребра
Ребра с вихрови генератори в
електростатично поле

Оребрени тръби

- Първа генерация
- Втора генерация
- Трета генерация
-
- Четвърта генерация
-

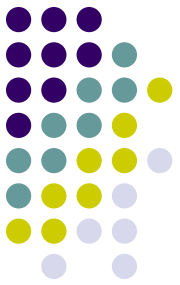
Гладка тръба
Гладки ребра
Зъбообразни външно оребрени
тръби
Зъбообразни външно оребрени
тръби в електростатично поле

По вътрешната повърхност (в канали), еднофазов поток

- Първа генерация
- Втора генерация
- Трета генерация
- Четвърта генерация
-

Гладка тръба
2-D “грапавост”
3-D “грапавост”
3-D “грапавост със спирална
лента

Генерации топлообменни технологии



- *По външната повърхност, кипене*

- Първа генерация Гладка тръба
- Втора генерация 2-D ребра
- Трета генерация 3-D ребра
- Четвърта генерация 3-D ребра в електростатично поле

- *По вътрешната повърхност (в тръби), кипене*

- Първа генерация Гладка тръба
- Втора генерация Масивни ребра и вложки
- Трета генерация Спираловидни микро ребра
- Четвърта генерация Тръби с микроребра в електростатично поле
-

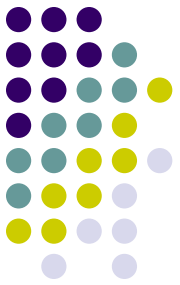
- *По външната повърхност, кондензация*

- Първа генерация Гладка тръба
- Втора генерация 2-D ребра
- Трета генерация 3-D ребра
- Четвърта генерация 3-D ребра в електростатично поле

- *По вътрешната повърхност (в тръби), кондензация*

- Първа генерация Гладка тръба
- Втора генерация 2-D ребра
- Трета генерация Спираловидни микро ребра
- Четвърта генерация Тръби с микроребра в електростатично поле
-

Класификация на техниките за интензификация на топлообмена



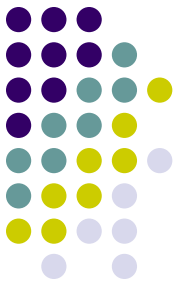
Пасивни техники

- Обработени повърхности
- “Грапави” повърхности”
- “Развити” повърхности
- Различни вложки, разположени в потока
- Устройства за завъртане на потока
- Извити тръби
- Устройства, въздействащи на повърхностното напрежение
- Флуидни добавки

Активни техники

- Механични добавки
- Повърхностна вибрация
- Вибриране на флуида
- Електростатични полета
- Вдухване и изсмукване
- Струйно въздействие

Класификация на техниките за интензификация на топлообмена

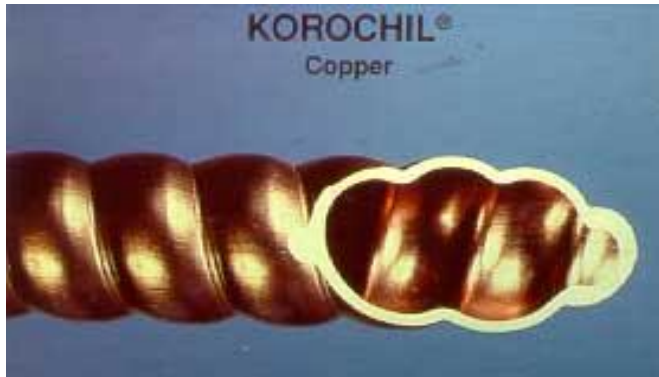
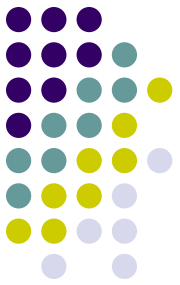


Съвместна интензификация (примери)

- “Грапави” повърхности със спирални ленти
- “Грапави” повърхности с акустични вибрации на потока
- Вътрешно оребрени тръби със спирални ленти
- Външно оребрени тръби в кипящ слой
- Външно оребрени тръби, подложени на вибриране
- Въртящи се нискооребрени (грапави) канали
- Нискооребрени (грапави) канали с генератори на надлъжни вихри
- Струйно въздействие върху нискооребрени (грапави) повърхности

- Тръби, предлагани в търговската мрежа





KoroChil



EATrufin



Korodense



HFTRufin



Korofin



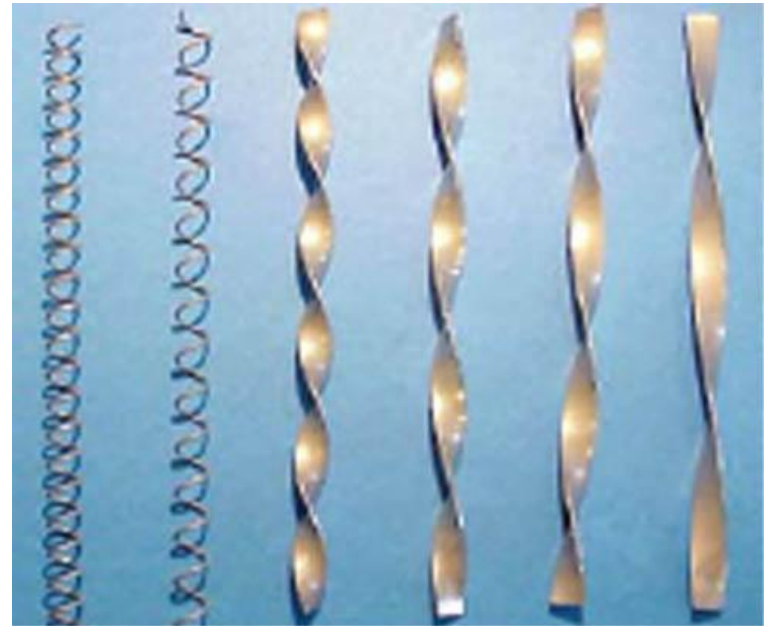
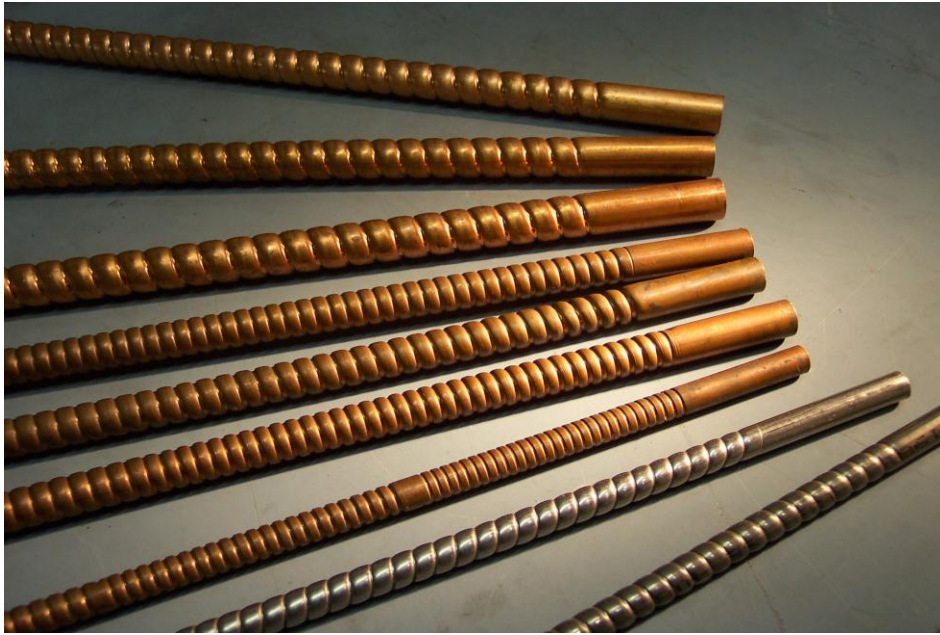
SteelFinTube



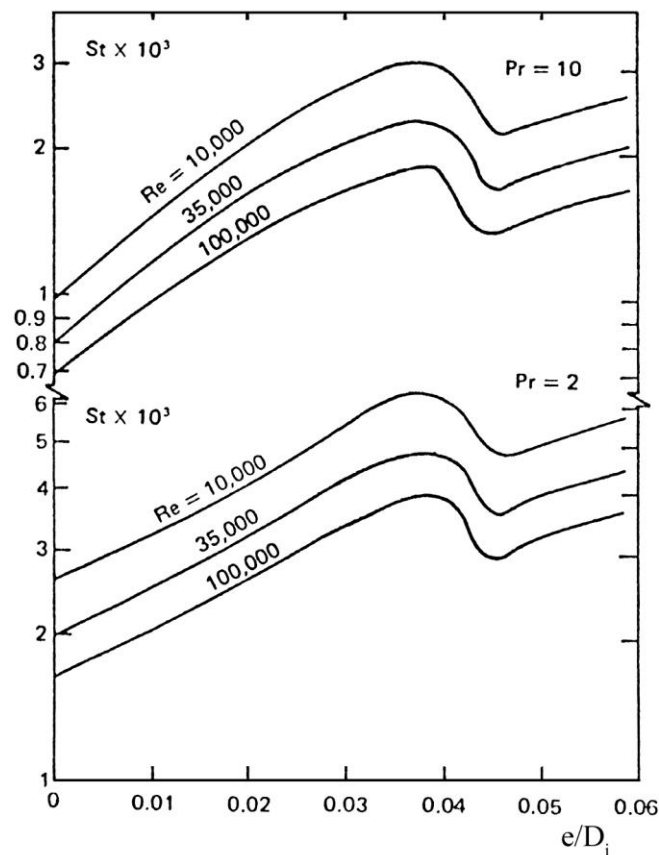
STTrufin



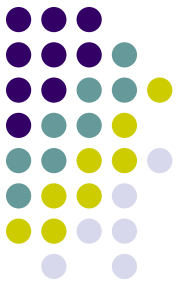
STTrufinSTTurboChil



Анализ на резултати от досегашни научни изследвания



Зависимост на St от относителната височина на турбулизатора e/D_i , Уидърс (1980а)



Основни въпроси

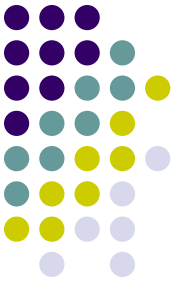
- Действително ли, СВТ с отношения $e/D_i > 0.045$ не са ефективни и производството им не е оправдано?
- Какво е влиянието на малките стъпки на турбулизаторите, $p/e < 9.0$, върху термодинамичната ефективност?
- Коя е областта, в която се намират оптималните стойности за e/D_i и p/e , при определена стойност на Re ?

Анализ на резултати от досегашни научни изследвания



Критерии за оценка

- Критерии, произтичащи от Първия закон на термодинамиката
 - Критерии FG (фиксирана геометрия)
 - Критерии VG (променлива геометрия)



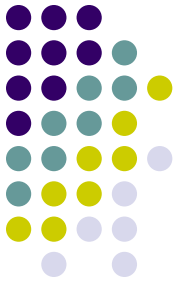
$$P_* = W_* \Delta p_* = f_* N_* D_* L_* u_{m,*}^3 = \frac{W_*^3 L_*}{N_*^2 D_*^5} f_*$$

$$\Delta p_* = f_* \frac{L_*}{D_*} u_{m,*}^2 = f_* \frac{L_*}{D_*^3} \frac{Re_R^2}{Re_S^2}$$

$$\frac{1}{(U_i A_i)_S} = \frac{1}{(\alpha_i A_i)_S} (1 + r_s + r_{ws} + r_{fs}) = \frac{1 + R_S}{(\alpha_i A_i)_S}$$

$$\frac{1}{(U_i A_i)_R} = \frac{1}{(\alpha_i A_i)_R} \left(1 + \frac{\alpha_{i,R}}{\alpha_{i,S}} R_R \right)$$

$$r_S = \frac{(\alpha_i A_i)_S}{(\alpha_o A_o)_S} = \frac{\alpha_{i,S}}{\alpha_{o,S} B_S} \qquad B_S = (A_o / A_i)_S$$



$$r_{ws} = \alpha_{i,S} D_{i,S} \ln(D_{o,S} / D_{i,S}) / (2k_w)$$

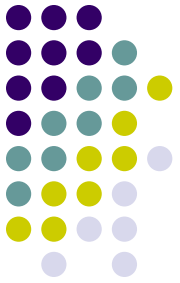
$$r_{fs} = \alpha_{i,S} R_{f,S}$$

$$R_S = r_S + r_{ws} + r_{fs}$$

$$R_R = \frac{r_R}{E_o} + r_{w,S} \frac{D_{i,R} \ln(D_{o,R} / D_{i,R})}{D_{i,S} \ln(D_{o,S} / D_{o,S})} + \alpha_{i,S} R_{f,R}$$

$$r_R = r_S B_S / B_R \quad B_R = (A_o / A_i)_R \quad E_o = \alpha_{o,R} / \alpha_{o,S}$$

$$\frac{(U_i A_i)_R}{(U_i A_i)_S} = \frac{1 + R_S}{\frac{St_S}{St_R} \frac{w_S}{w_R} \frac{A_{i,S}}{A_{i,R}} + R_R \frac{A_{i,S}}{A_{i,R}}}$$



$$\frac{(U_i A_i)_R}{(U_i A_i)_S} = \frac{1 + R_S}{\frac{St_S}{St_R} \left(f_* P_*^{-1} A_*^{-2} \right)^{1/3} + R_R A_*^{-1}}$$

$$A_* = N_* L_* D_*$$

$$W_* = N_* w_* D_*^2 = N_* u_{m,*} D_*^2 = N_* D_* \frac{Re_R}{Re_S}$$

$$Q_* = W_* \varepsilon_* \Delta T_i^*$$

$$Q_* = W_* \varepsilon_*$$

$$(NTU)_R = (NTU)_S (U_i A_i)_* W_*^{-1}$$

$$\Delta T_i^* = \varepsilon_*^{-1} W_*^{-1}$$

Критерии, произтичащи от Втория закон на термодинамиката



Фиксирана геометрия на апарата (FG)

Случай FG-1a – Цел: $Q_* > 1$, $N_s < 1$. Ограничения: $\Delta T_i^* = 1$, $W_* = 1$, $N_* = 1$, $L_* = 1$, които изискват $P_* > 1$.

$$Re_S = D_* Re_R$$

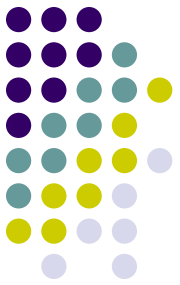
$$N_S = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(Q_* \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_S} D_*^{-0.8} \right) \right) \left(\frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} + Q_* \left(1 - \frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} \right) \right)^{-1} + \phi_o \frac{f_R / f_S}{D_*^{4.75}} \right) = f(Re)$$

Случай FG-2a - Цел: $Q^* > 1$, $NS < 1$. Ограничения: $\Delta T_i^* = 1$, $N^* = 1$, $L^* = 1$, $P^* = 1$, които изискват $W^* = 1$.

$$Re_S = Re_R \left(f_R / f_S \right)^{0.364} D_*^{-0.727} = f(Re_R)$$

$$N_S = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(Q_* \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_S} (f_R / f_S)^{0.073} D_*^{-1.145} \right) \right) \times \left[\frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} + Q_* (f_R / f_S)^{0.364} D_*^{-1.727} \left(1 - \frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} \right) \right]^{-1} + \phi_o \right) = f(Re_R)$$

Критерии, изискващи променлива геометрия (VG)



Случай VG-1

Цел: $A_* < 1$, $N_s < 1$. Ограничения: $\Delta T_i^* = 1$, $W_* = 1$, $N_* > 1$, $L_* < 1$, $P_* = 1$.

$$Re_s = Re_R \left(\frac{f_R}{f_s} A_* \right)^{0.364} D_*^{-1.091} = f(Re_R)$$

$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(\left(\frac{f_R}{f_s} A_* \right)^{-0.364} D_*^{2.091} \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_s} (f_R / f_s)^{-0.291} A_*^{0.709} D_*^{-0.127} \right) \right) + \phi_o / N_* \right) = f(Re_R)$$

Случай VG-2



Случай VG-2a – Цел: $Q_* > 1$, $N_s < 1$. Ограничения: $\Delta T_i^* = 1$, $A_* = 1$, $N_* = 1$, $L_* = 1$, $P_* = 1$, които изискват $W_* = 1$.

$$Re_s = Re_R (f_R / f_s)^{0.364} D_*^{-1.091} = f(Re_R)$$

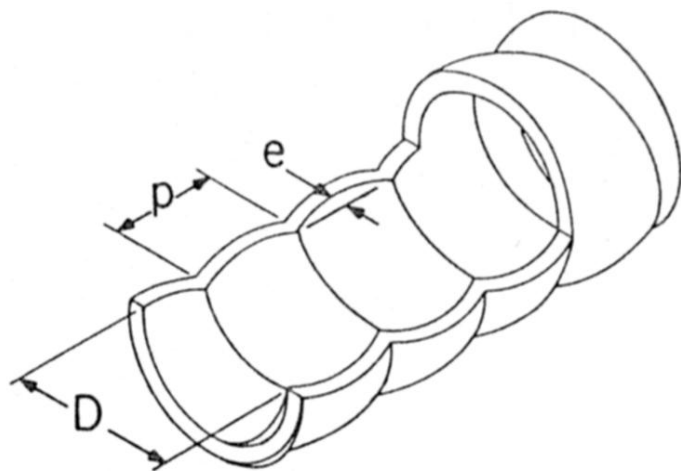
$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left\{ \frac{Nu_s}{Nu_R} (f_R / f_s)^{-0.073} D_*^{2.218} Q_*^2 \left[\frac{T_{i,s}}{T_{o,s}} + \right. \right.$$

$$\left. Q_* \left(1 - \frac{T_{i,s}}{T_{o,s}} \right) \right]^{-1} + \phi_o / N_* \left. \right\} = f(Re_R)$$

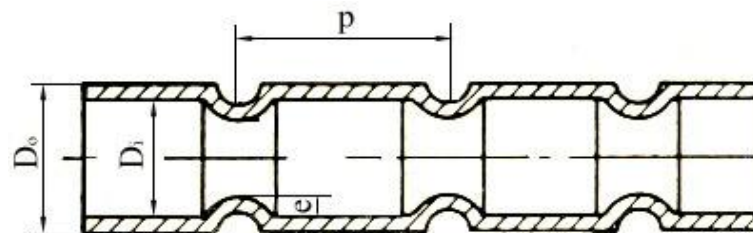


Геометрични параметри на изследваните тръби

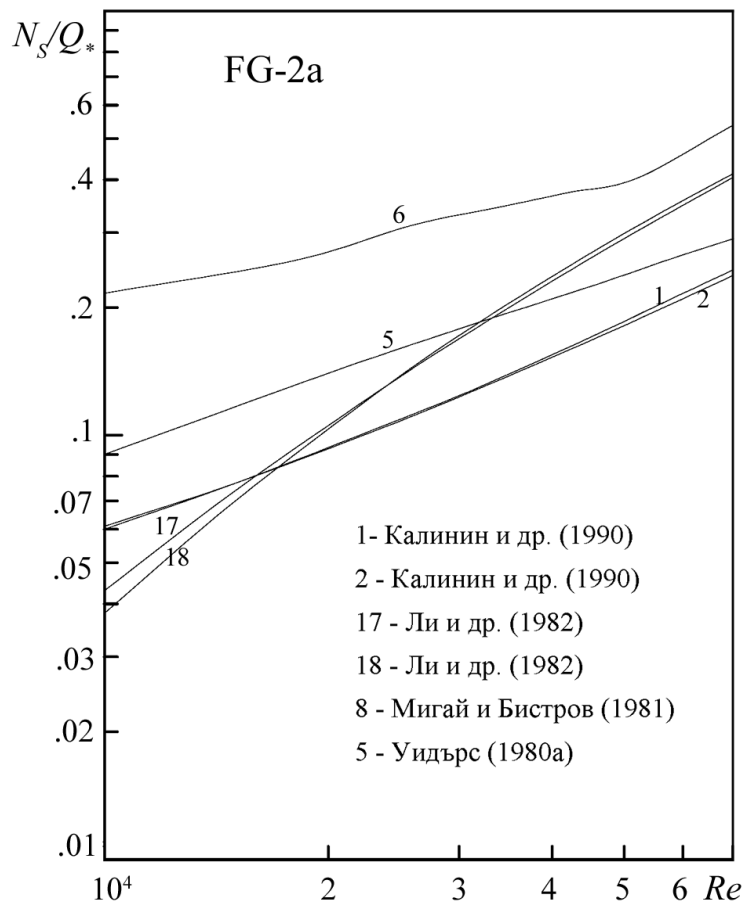
№.	Автор	D_i	e	p	β	e/D_i	p/e	β_*
		mm	mm	mm	deg	-	-	-
1	Калинин и др. (1990)	10.0	0.55	2.50	90	0.055	4.55	1.0
2	Калинин и др. (1990)	10.0	0.50	2.50	90	0.050	5.00	1.0
17	Ли и др. (1982)	18.0	1.220	9.50	80.3	0.069	7.79	0.892
18	Ли и др. (1982)	18.0	0.960	8.00	81.7	0.055	8.33	0.908
8	Мигай и Бистров (1981)	18.0	3.50	60.0	43.3	0.194	17.1	0.481
5	Уидърс (1980а)	17.32	0.904	15.77	73.8	0.057	18.5	0.883
4	Чен и др. (2001)	18.86	2.21	9.00	61.4	0.117	4.07	0.682



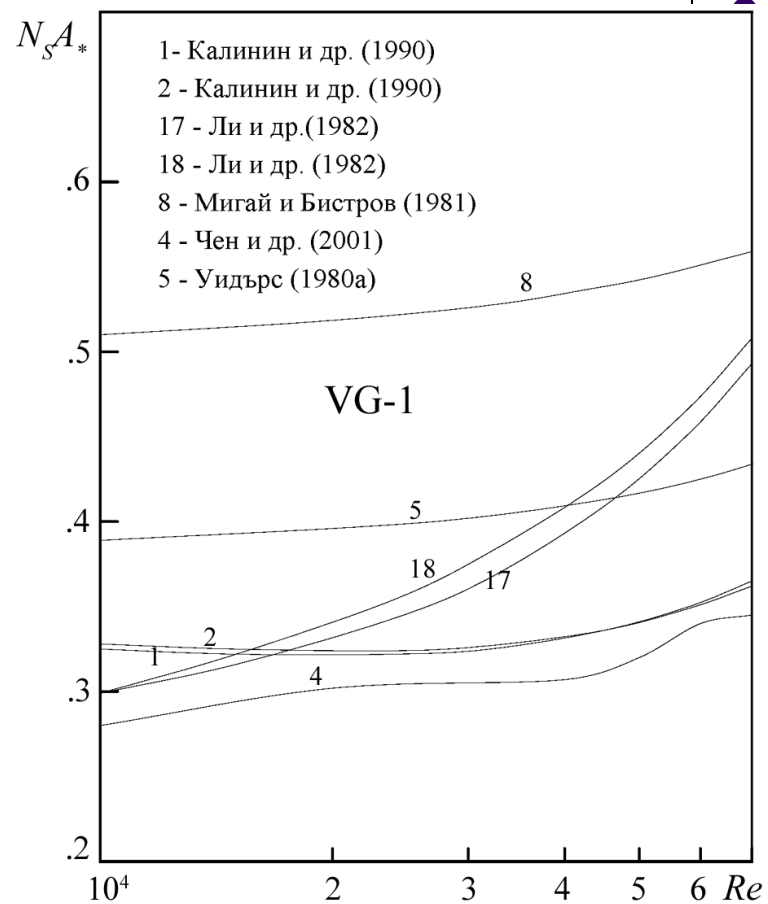
**Геометрични параметри на спирално
– валцовани тръби**



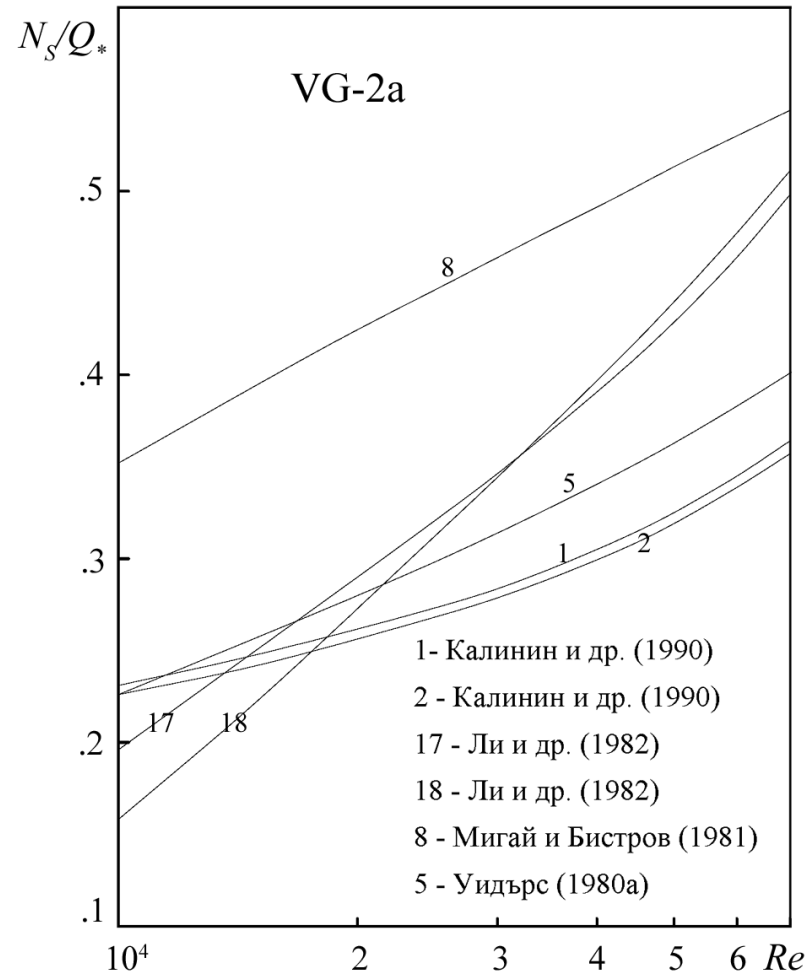
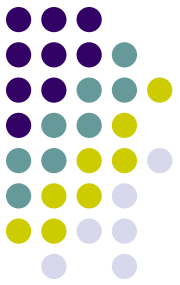
**Геометрични параметри на напречно
– валцовани тръби**



Отношение N_s/Q_* в зависимость от Re

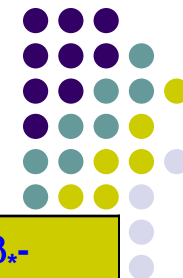


Отношение $N_s A_*$ в зависимость от Re

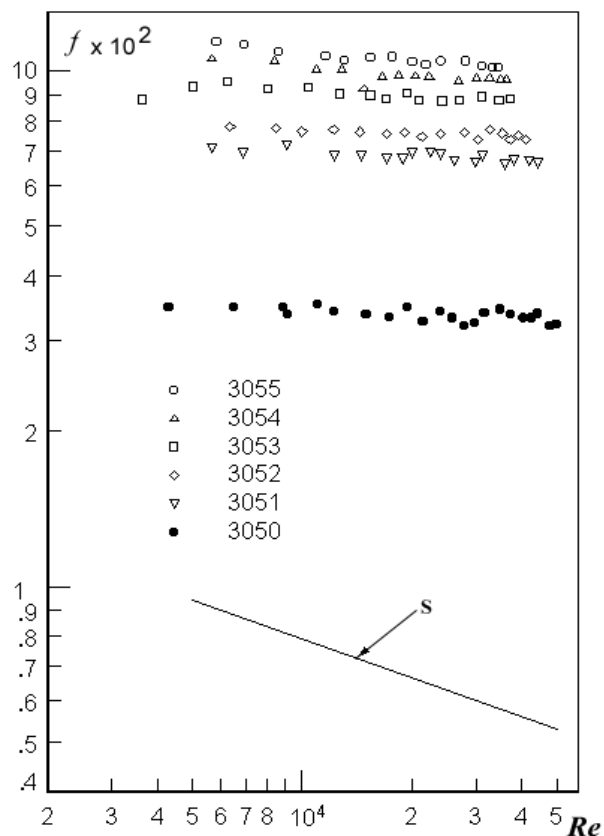


Отношение N_s/Q_* в зависимость от Re

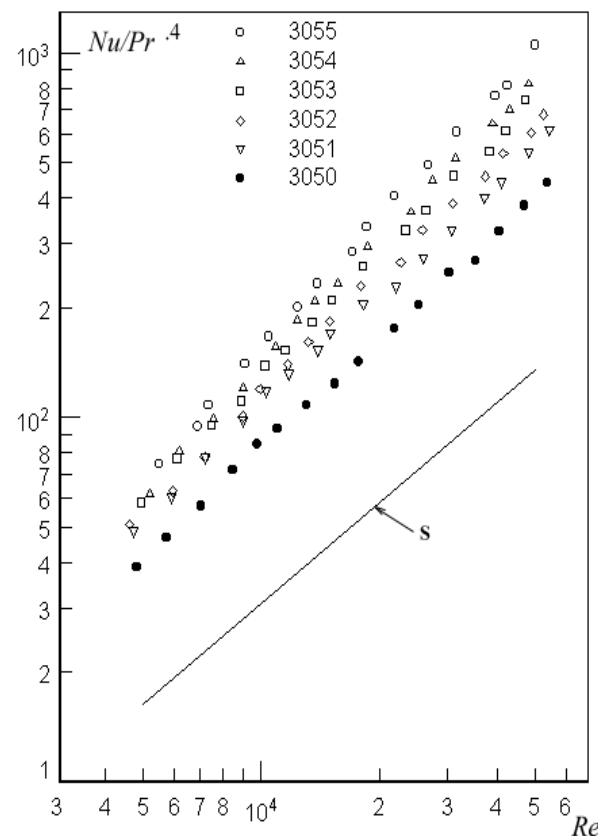
Геометрични параметри на изследваните тръби



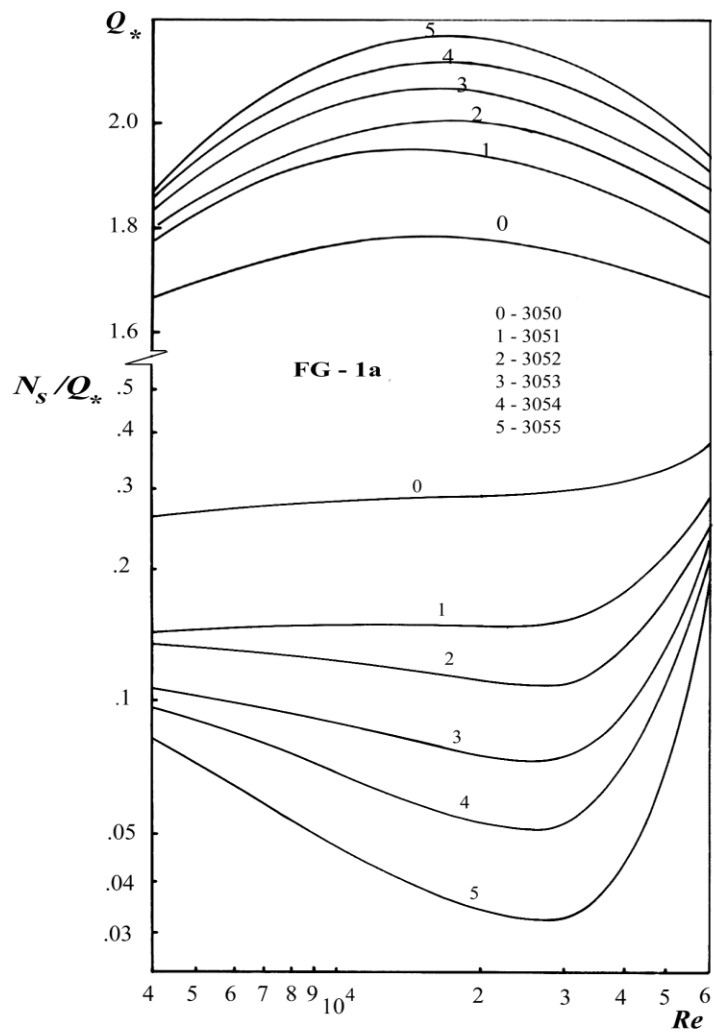
No	D_i mm	e mm	p mm	β (°)	e/D_i -	p/e -	β_{*-}
3050	13.15	0.593	5.06	83.0	0.0451	8.5	0.922



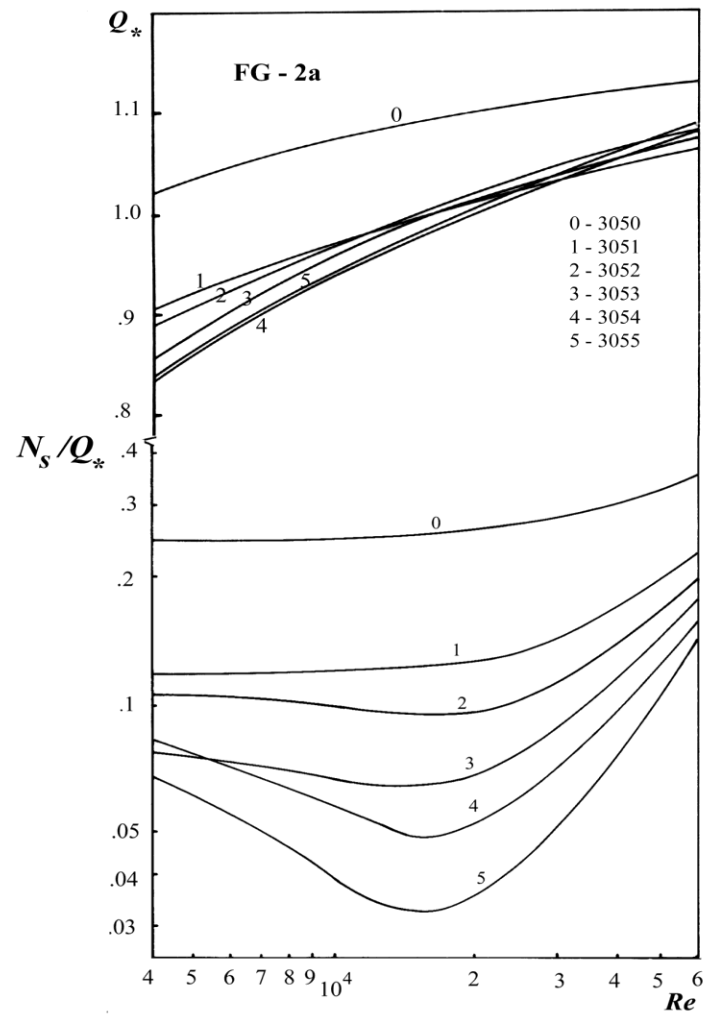
Изменение на f в зависимост от Re
Зимпоров и Петков (2002)



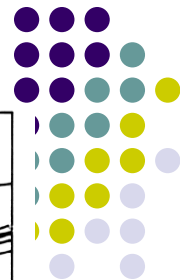
Изменение на $Nu/Pr^{0.4}$ в зависимост от Re
Зимпоров и Петков (2002)

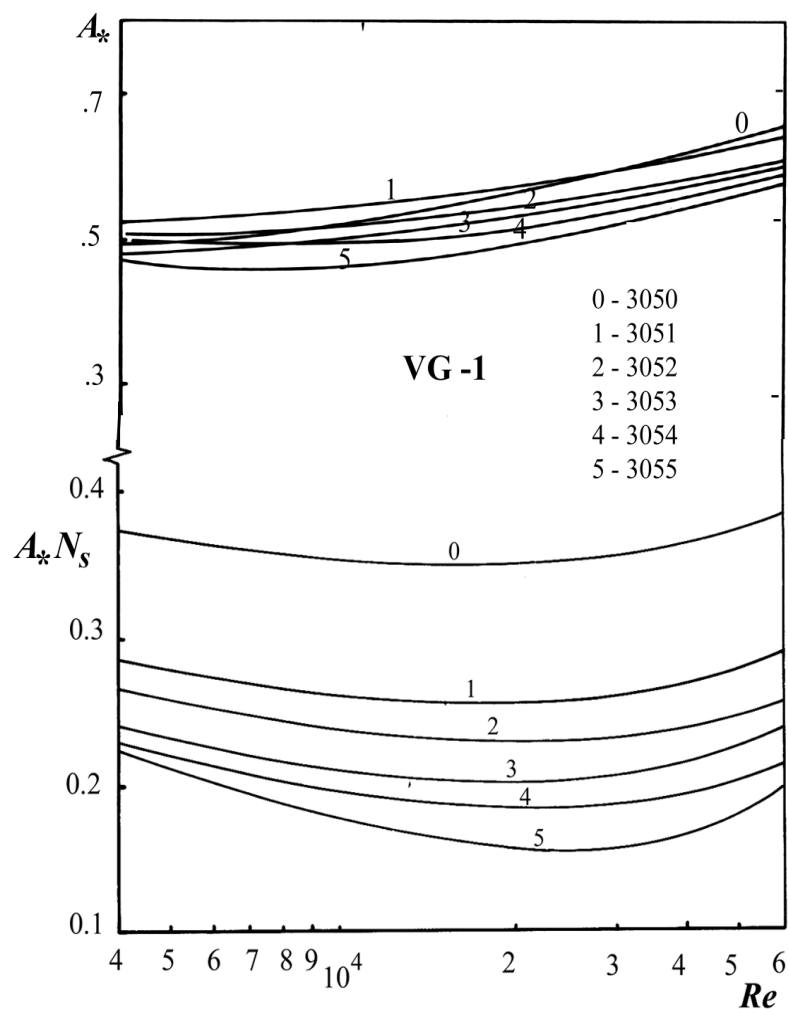
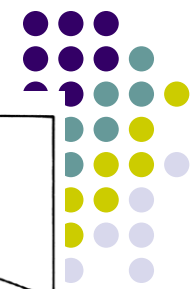


Отношение N_s/Q_* в зависимость от Re

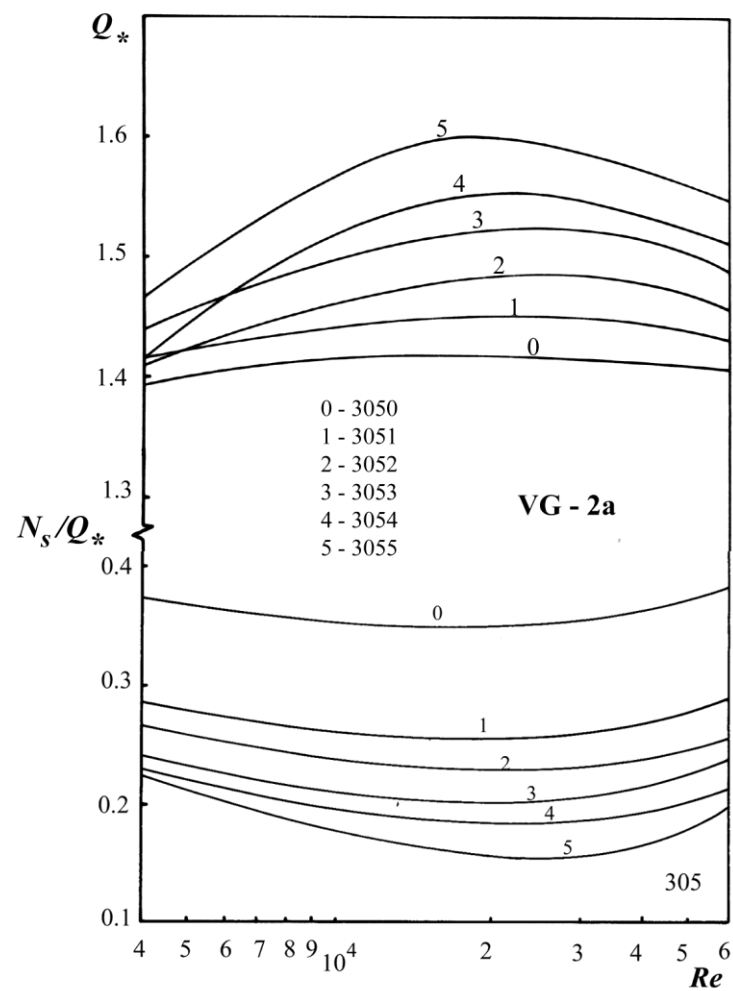


Отношение N_s/Q_* в зависимость от Re





Отношение $N_s A_*$ в зависимость от Re



Отношение N_s/Q_* в зависимость от Re

ЦЕЛИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА



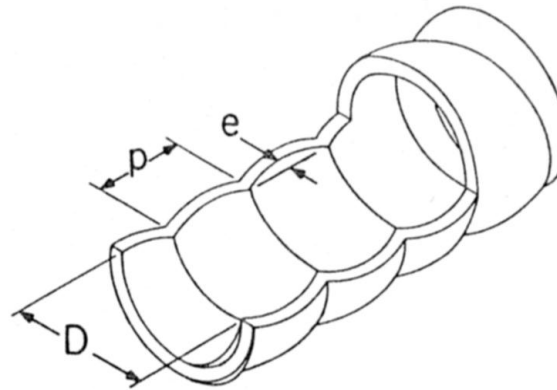
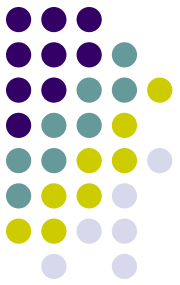
- **1.** Да се изследва по опитен път съвместна интензификация на топлообмена, при турбулентно течение на еднофазов поток в кръгла тръба, чрез използване на дълбоки СВТ, комбинирани със спирални ленти с различни геометрични параметри, за постигане на максимално възможната термодинамична ефективност. Област за геометричните параметри $e/D_i > 0.050$, $p/e < 8.0$, $H/D_i < 8.0$ и $Re = (3 \times 10^3 - 5 \times 10^4)$ и определяне на границата, при която този ефект се изчерпва.
- **2.** Да се провери хипотезата на Уидърс, за съществуването на втори максимум на функцията $E_{hi} = f(Re, e/D_i, p/e,)$ в областта $e/D_i > 0.050$ и каква е големината му в зависимост от p/e за СВТ.
- **3.** Да се провери дали съществува едновременно зависимост на вътрешната (комбинирана) и външна (проста) интензификация на топлообмена от геометричните параметри на турбулизаторите и вътрешния режимен параметър Re ?



ЦЕЛИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

- **4.** Да се извърши оценка за термодинамичната ефективност от прилагането на съвместна интензификация от вида – дълбоко СВТ и спирални ленти, за различни случаи от практически
- **5.** Да се покаже практическата ползност от използването на “съвместна интензификация” при създаването на по-ефективни кожухотръбни топлообменни апарати.

ВЛИЯНИЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ТУРБУЛИЗАТОРА ВЪРХУ ТЕРМОДИНАМИЧНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЕДНОХОДОВИ СПИРАЛНО-ВАЛЦОВАНИ ТРЪБИ



Геометрични характеристики на спирално-валцовани тръби

$$E_f \equiv f_R / f_S = f(e / D_i, p / e, \beta_*, \text{Re})$$

$$E_{h,i} \equiv \text{Nu}_R / \text{Nu}_S = f(e / D_i, p / e, \beta_*, \text{Re})$$

$$\phi = \frac{e^2}{p D_i}$$

$$E_f = c_f \text{Re}^m$$

$$E_{h,i} = c_h \text{Re}^n$$

Геометрични параметри на изследваните тръби

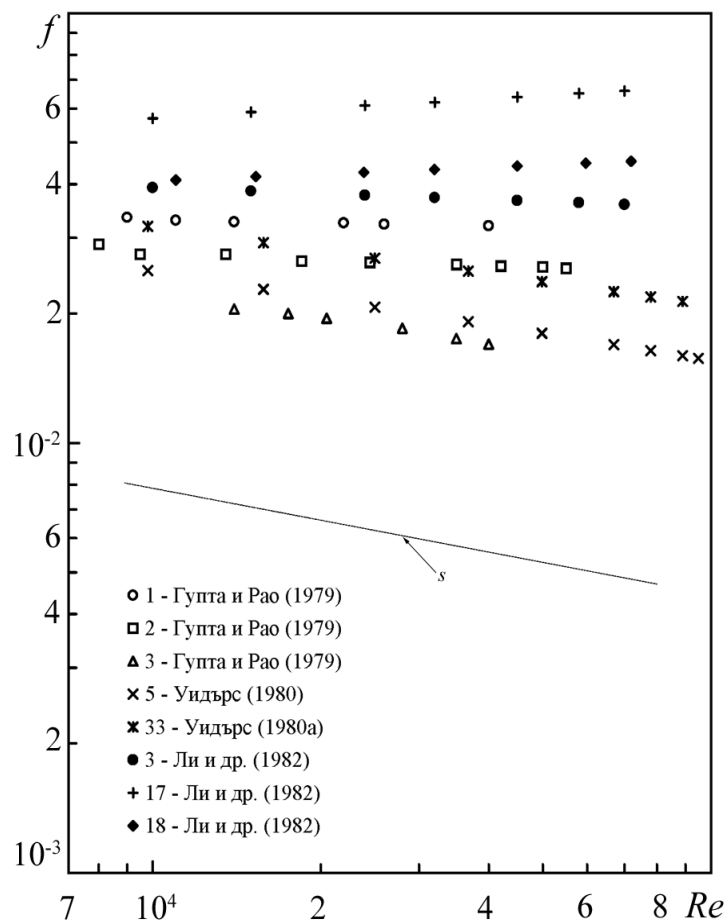


Автор	No.	D_i , mm	e , mm	p , mm	β (°)	e/D_i	p/e	$\phi \times 10^3$	β_*
Ли и др.(1982)	3	18.0	0.948	9.9	80.0	0.053	10.40	5.043	0.889
	17	18.0	1.220	9.5	80.3	0.069	7.79	8.704	0.892
	18	18.0	0.960	8.0	81.7	0.055	8.33	6.400	0.908
Уидърс (1980а)	5	17.32	0.904	15.77	73.8	0.057	17.50	2.986	0.820
	33	21.92	1.036	12.73	79.5	0.047	12.30	3.846	0.883
Зимпаров и др. (1991)	11	25.25	0.808	14.47	80.5	0.032	17.9	1.787	0.894
	12	25.43	0.818	14.42	80.5	0.032	17.6	1.825	0.894
	13	25.22	0.833	12.41	81.8	0.035	14.9	2.217	0.909
	17	25.18	0.984	14.47	80.4	0.039	14.7	2.657	0.937
	18	25.20	1.022	10.95	82.7	0.041	10.7	3.785	0.919
	21	26.06	0.876	14.46	80.4	0.034	16.5	2.036	0.893
	22	25.44	0.823	14.32	80.6	0.032	17.4	1.859	0.896
	27	25.14	0.972	14.34	84.3	0.039	14.8	2.621	0.894
	28	25.26	0.979	10.96	82.7	0.039	11.2	3.462	0.919
	29	25.48	0.763	16.85	79.0	0.040	16.6	2.414	0.878
	35	24.90	1.165	14.20	80.5	0.047	12.2	3.839	0.894

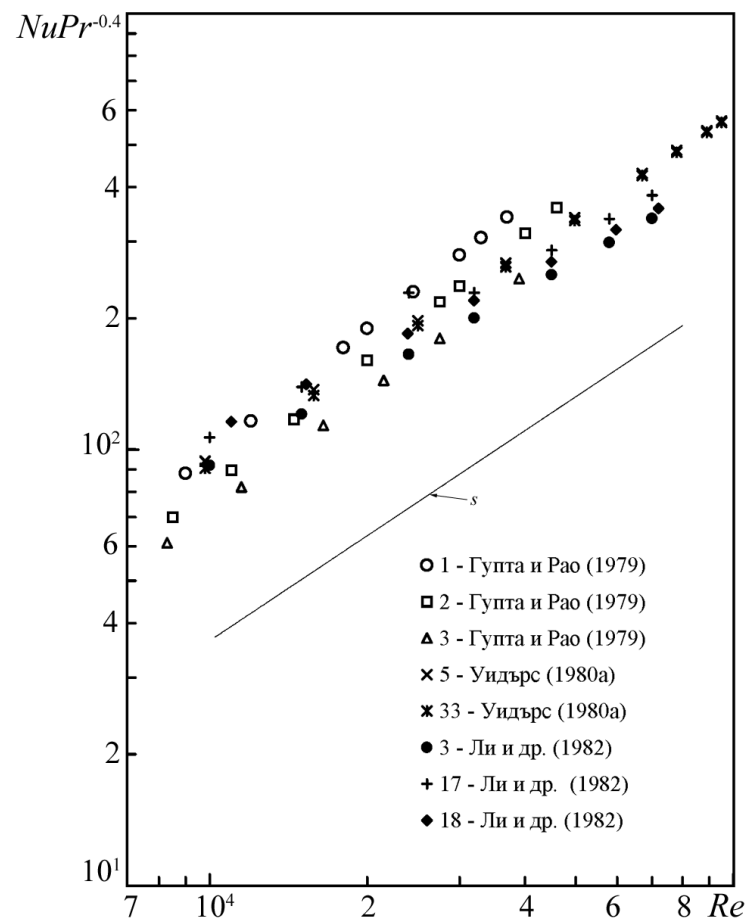
Геометрични параметри на изследваните тръби



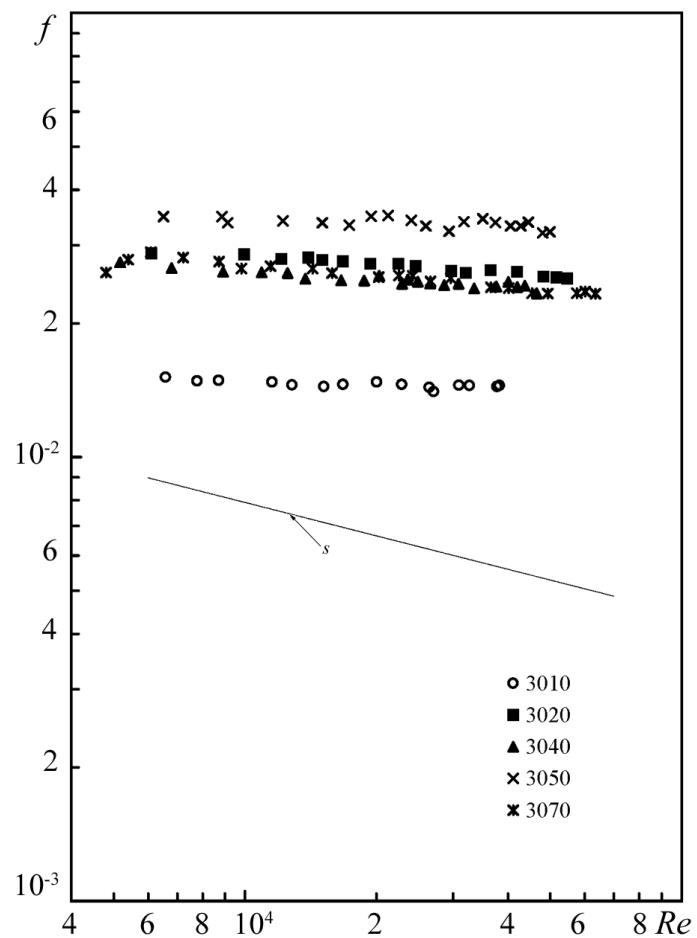
Автор	No.	D_i , mm	e , mm	p , mm	$\beta(^{\circ})$	e/D	p/e	$\phi \times 10^3$	β_*
Зимпаров (2004а)	3010	13.90	0.312	5.76	82.4	0.022	18.46	1.216	0.916
	3020	12.44	0.515	4.48	83.4	0.041	8.70	4.759	0.927
	3040	13.39	0.497	5.77	82.2	0.037	11.61	3.197	0.913
	3050	13.15	0.593	5.06	83.0	0.045	8.53	5.285	0.922
	3070	13.65	0.622	8.12	79.3	0.046	13.05	3.491	0.881
Настоящо изследване	5010	13.68	0.797	7.57	80.0	0.058	9.50	6.134	0.889
	5020	13.64	0.772	6.26	81.7	0.056	8.11	6.980	0.908
	5030	13.51	0.767	5.19	83.0	0.057	6.77	8.390	0.922
	5040	14.04	0.797	8.73	78.8	0.057	10.95	5.182	0.875
	5050	13.99	0.744	6.55	81.5	0.053	8.80	6.041	0.905
	5060	14.00	0.578	4.78	83.8	0.041	8.27	4.992	0.931
	6010	14.12	1.256	11.71	75.2	0.089	9.32	9.541	0.836
	6020	14.02	1.122	10.56	76.5	0.080	9.41	8.503	0.850
	6030	13.98	1.073	9.194	78.2	0.077	8.57	8.958	0.869



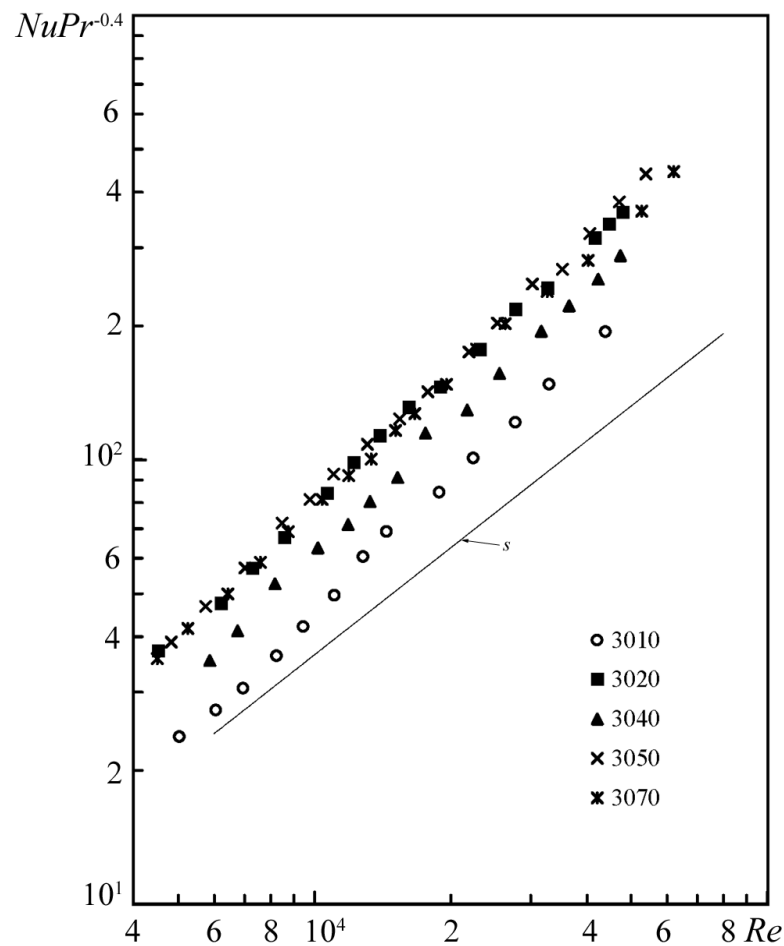
Изменение на f от Re



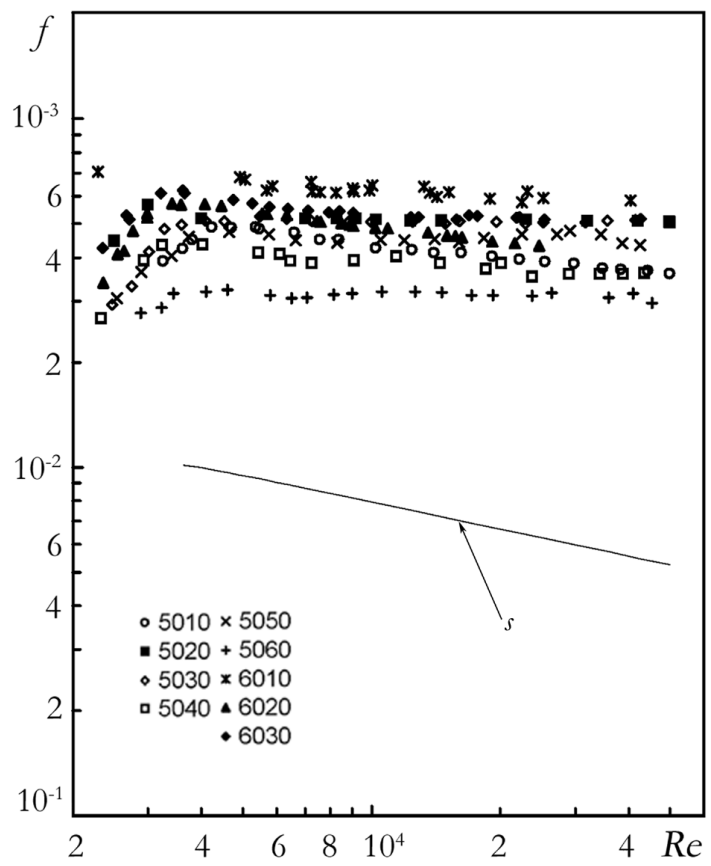
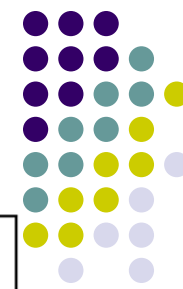
Изменение на $NuPr^{0.4}$ от Re



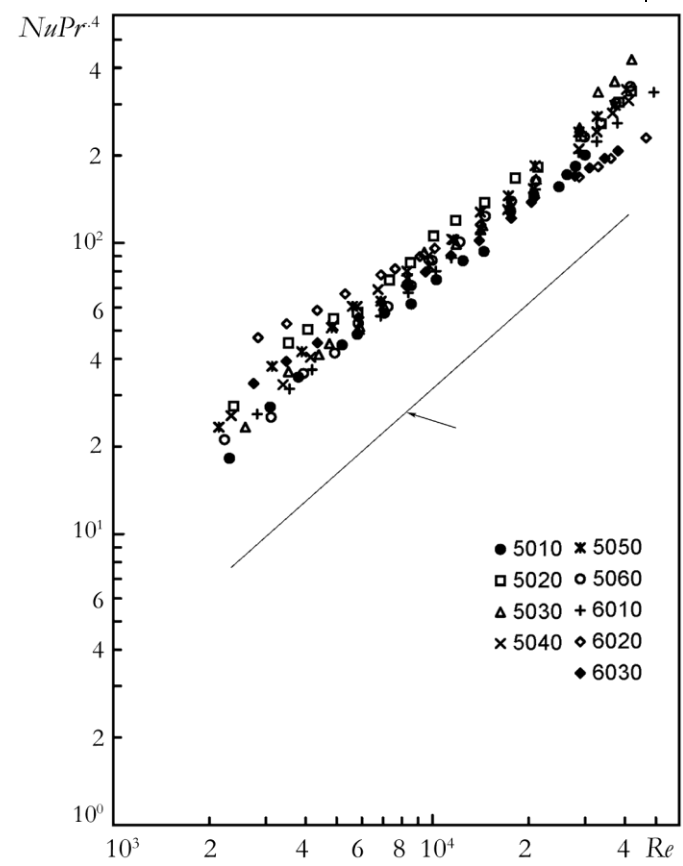
Изменение на f от Re ,
Зимпаров (2004a)



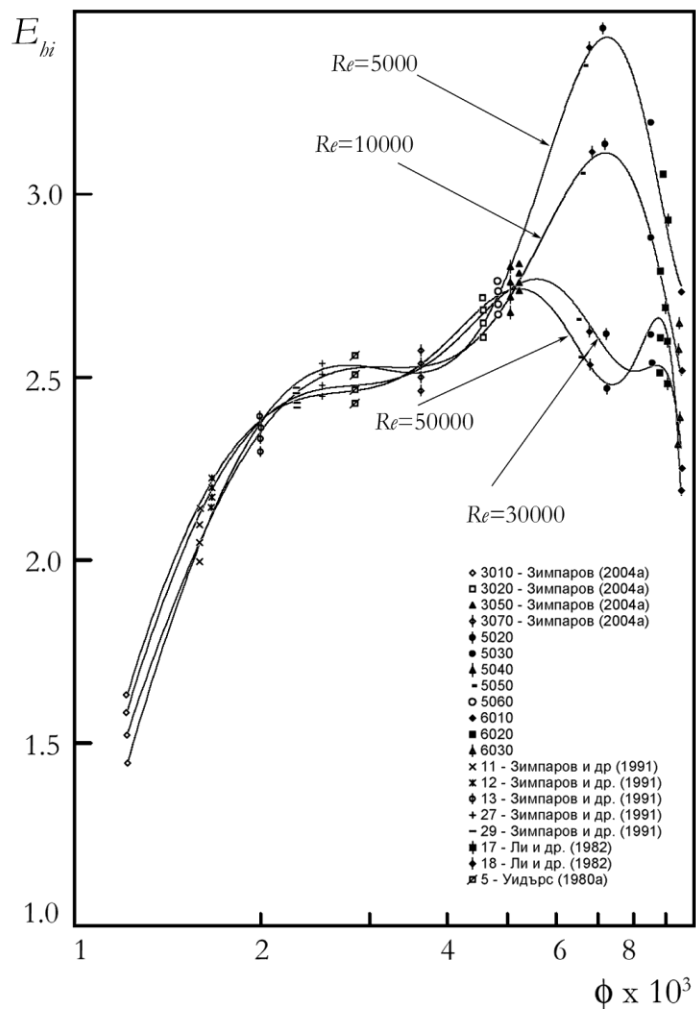
Изменение на $NuPr^{0.4}$ от Re
Зимпаров (2004a)



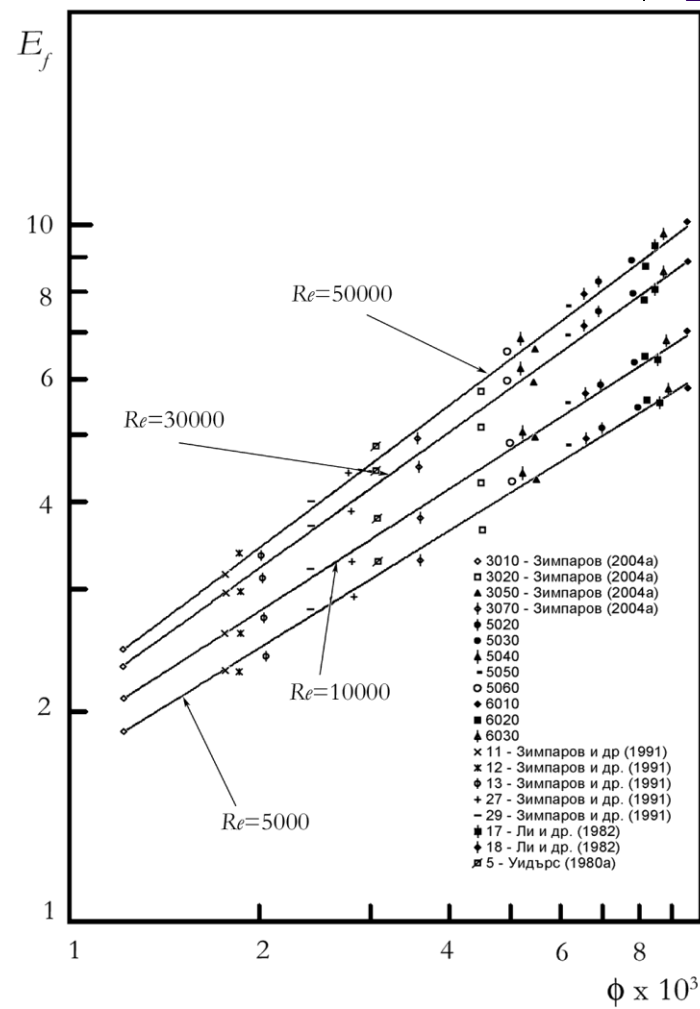
**Изменение на f от Re ,
(настоящото изследване)**



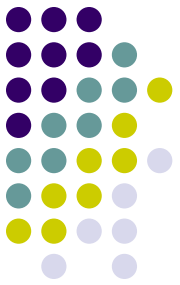
**Изменение на $NuPr^{0.4}$ от Re
(настоящото изследване)**



Изменение на E_{hi} от ϕ



Изменение на E_f от ϕ



$$E_f = 1 + 37.83 \text{Re}^{0.239} \phi^{0.855}$$

$$1.216 \times 10^{-3} \leq \phi \leq 9.541 \times 10^{-3}$$

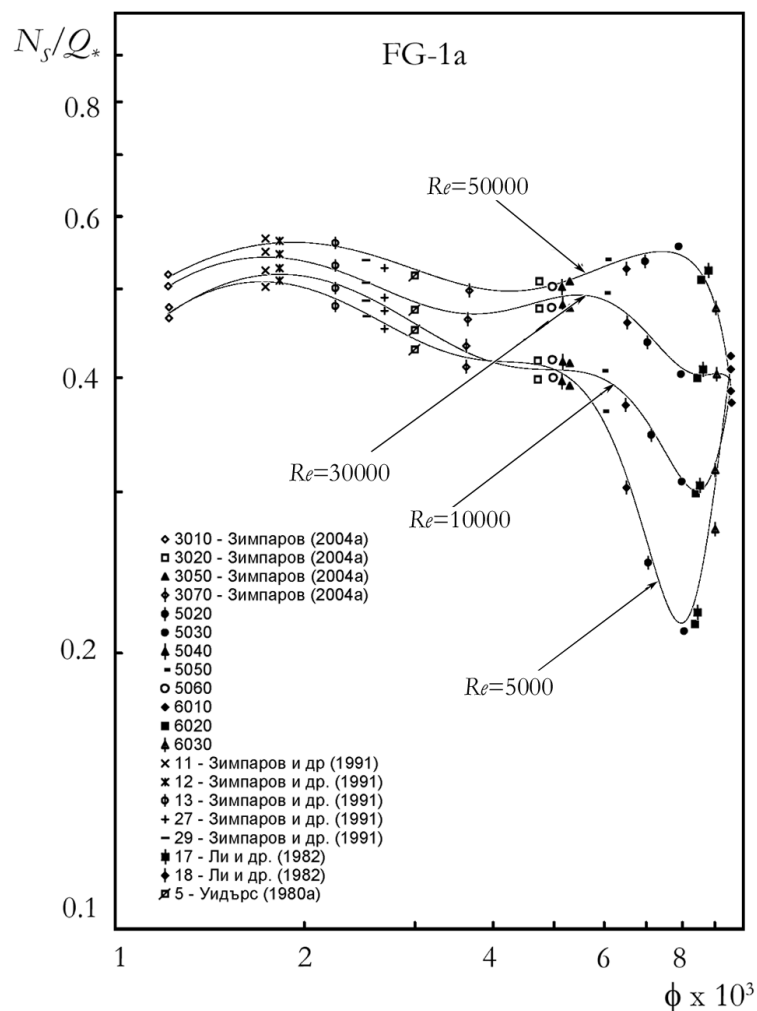
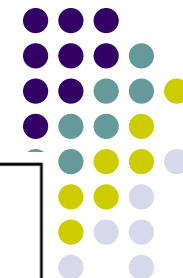
$$5 \times 10^3 < \text{Re} < 6 \times 10^4$$

No	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
159	117	73.6	23	14.5	15	9.4	4	2.5

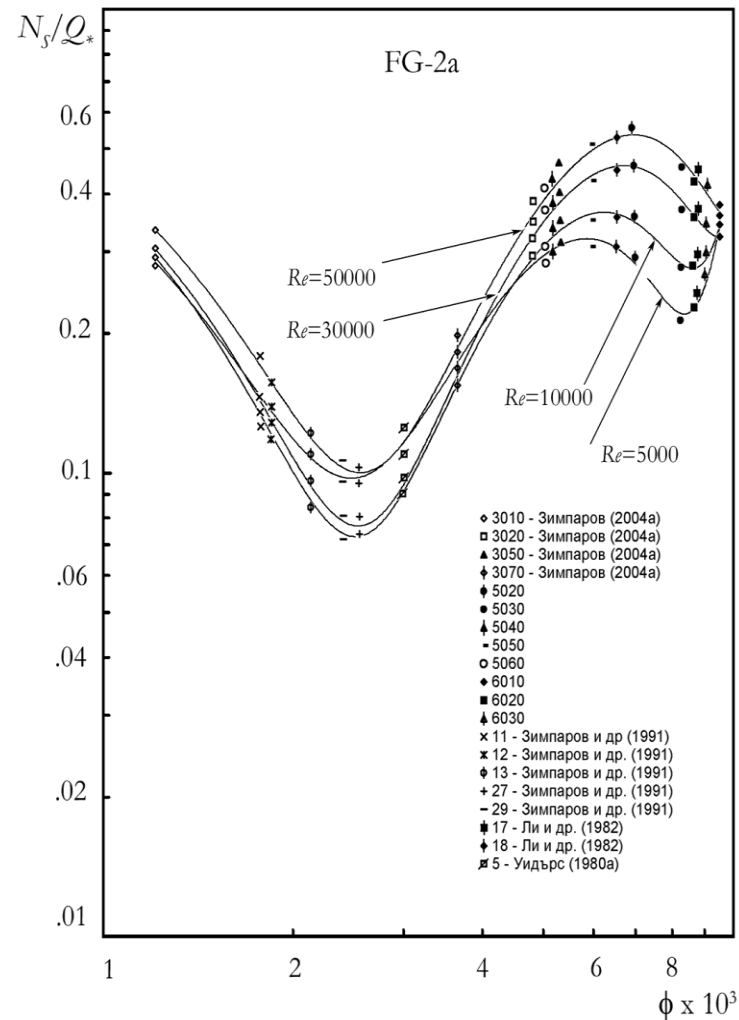
$$E_{h,i} = 1 + 8.589 \text{Re}^{-0.203} (e/D_i)^{0.566} (p/e)^{1.162} \beta_*^{7.571}$$

$$0.047 \leq e/D_i \leq 0.089 \quad 0.820 \leq \beta_* \leq 0.889 \quad 10^4 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^4 \quad p/e > 9.0$$

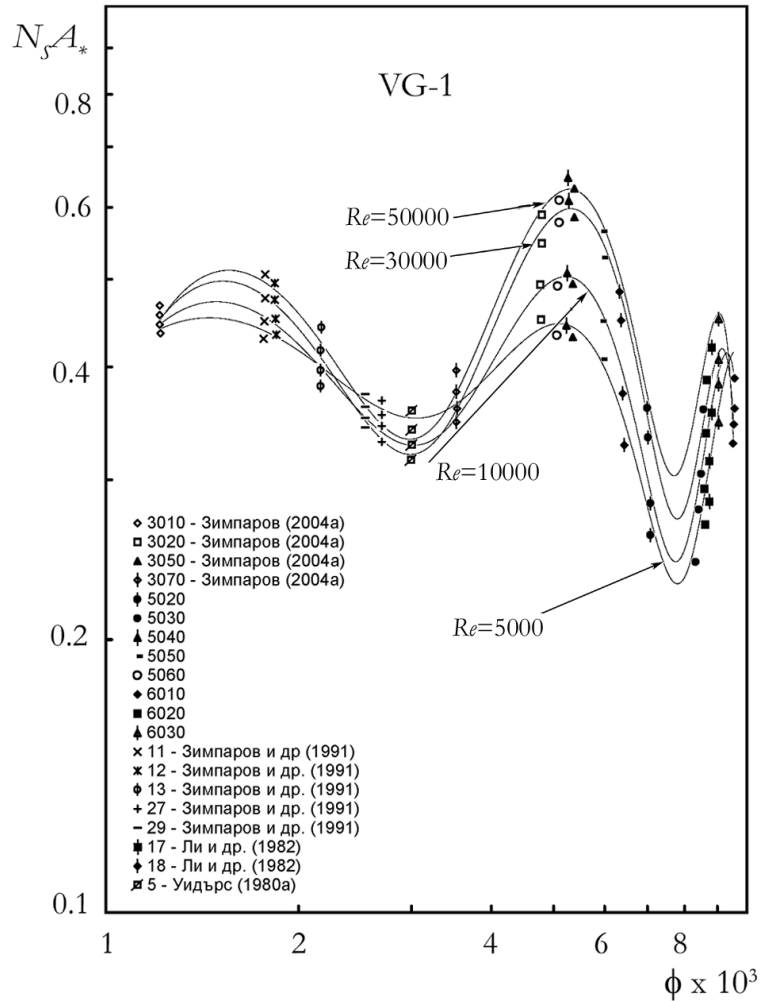
N	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
48	33	68.7	6	12.5	7	14.7	2	4.2



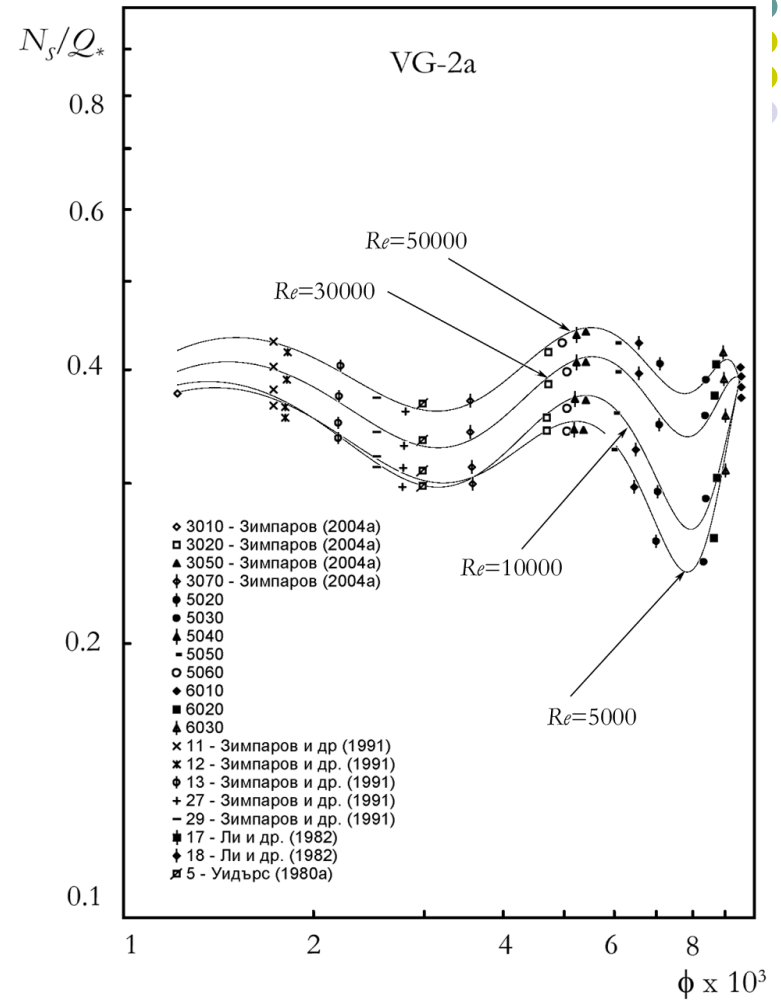
Изменение на N_s/Q_* от ϕ



Изменение на N_s/Q_* от ϕ



Изменение на $N_s A_*$ от ϕ



Изменение на N_s / Q_* от ϕ

Експериментални изследвания и резултати

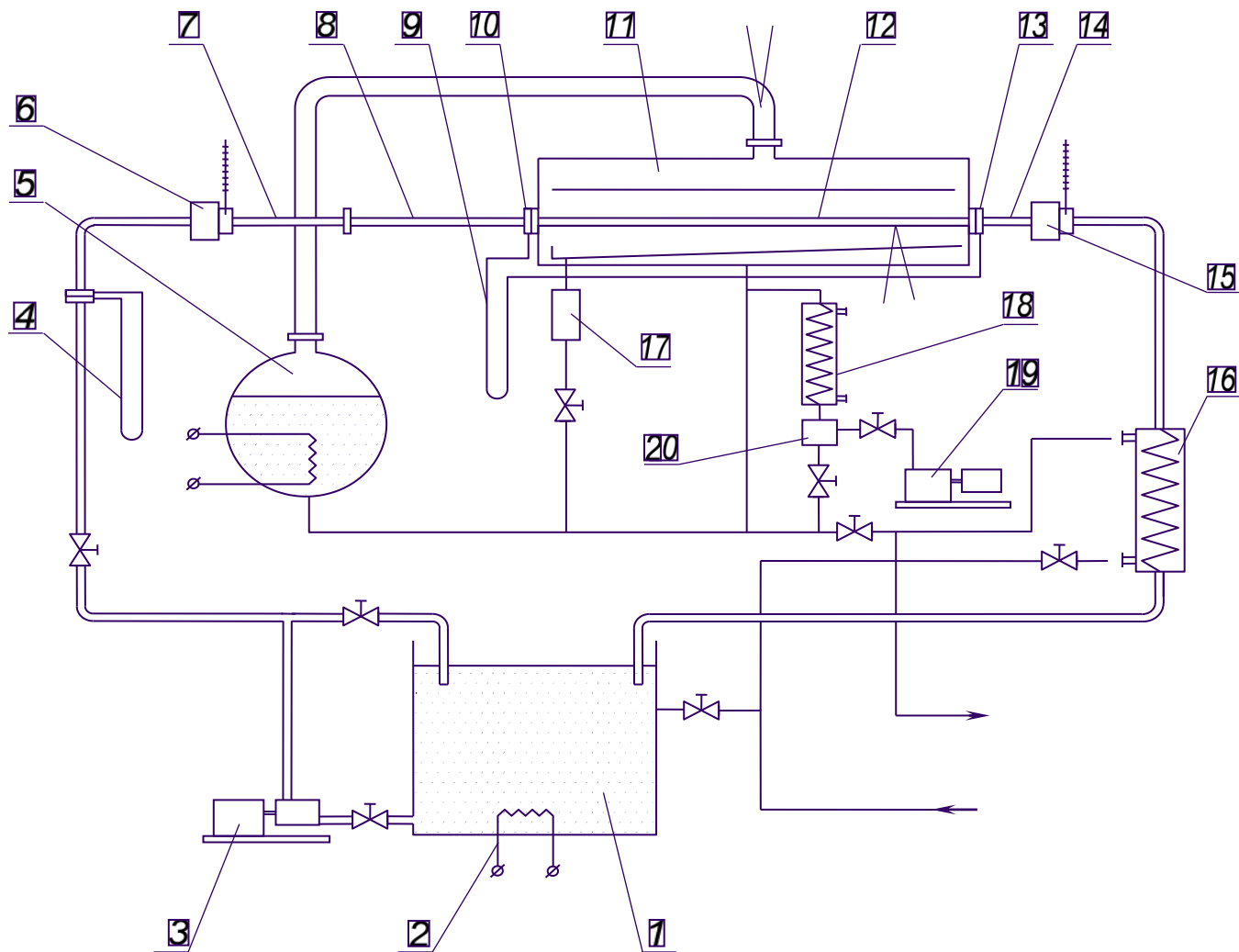
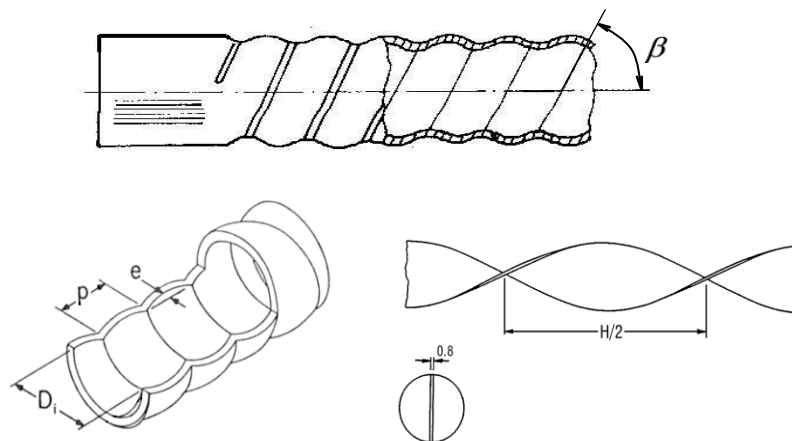
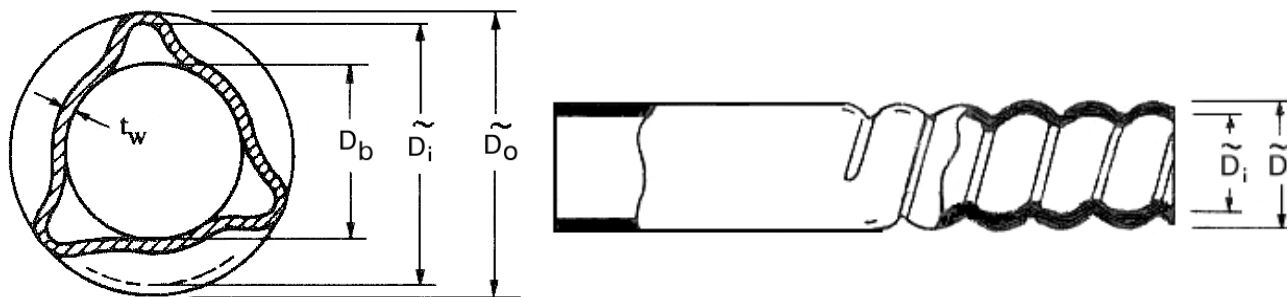


Схема на опитната уредба



Характеристични параметри на СВТ и спиралните ленти



Определяне на вътрешния обвиващ, външния обвиващ и минималния диаметър на тръба с валцовани турбулизатори

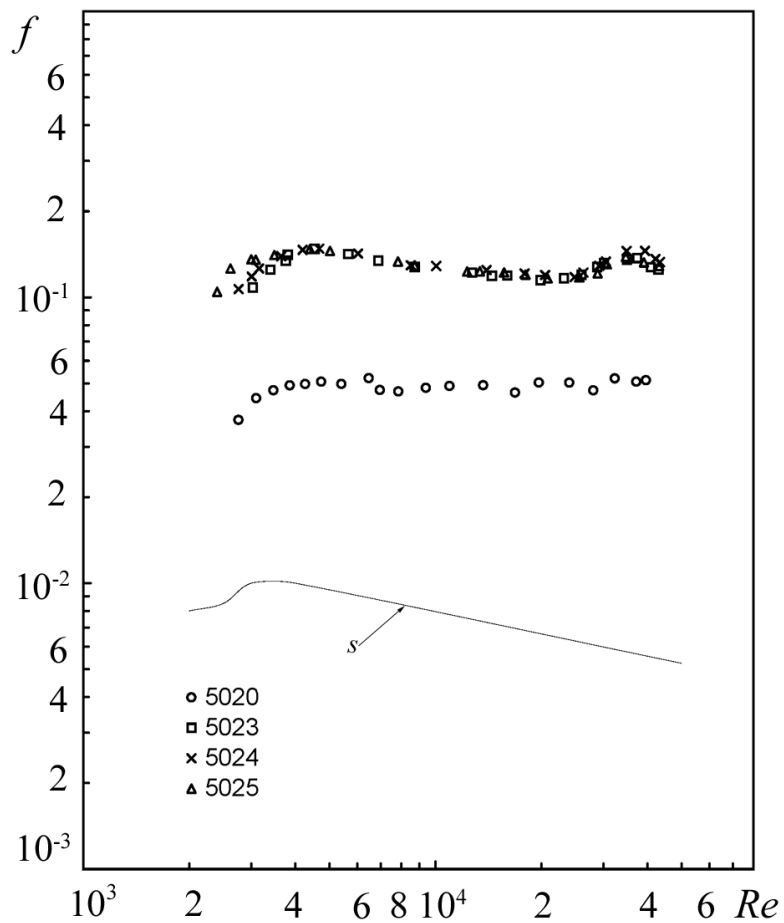
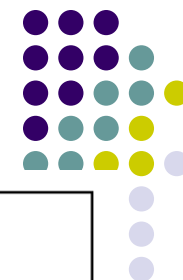
Геометрични параметри на изследваните тръби



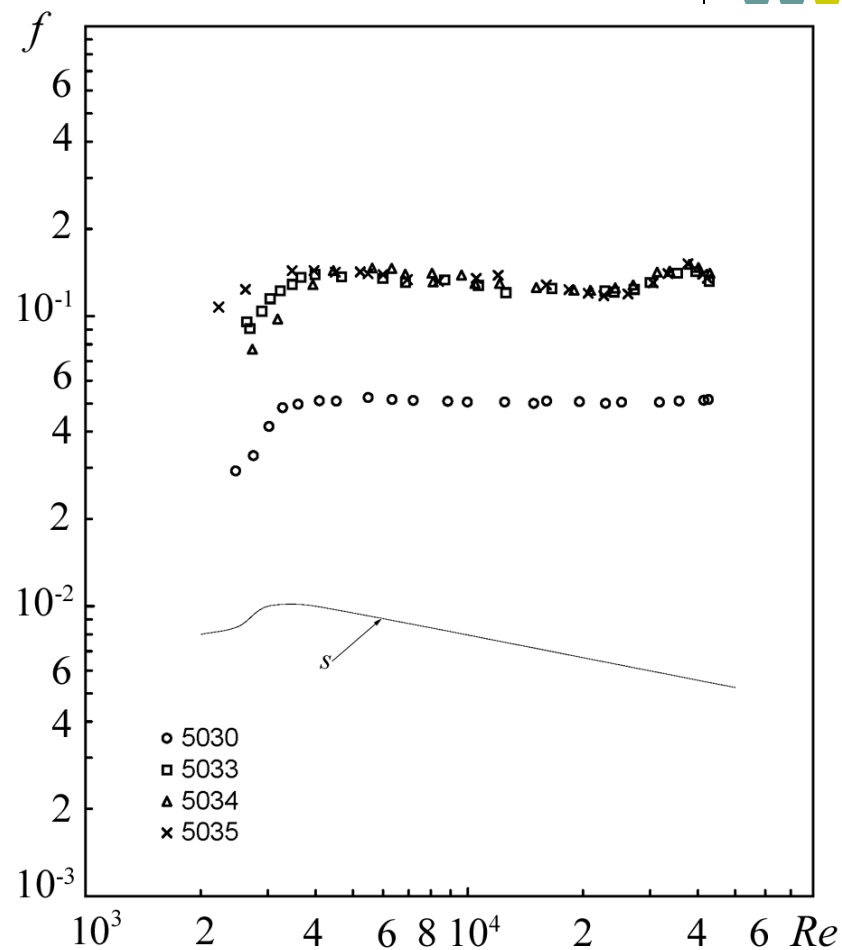
Автор	No.	D_i , mm	e , mm	p , mm	$\beta(^{\circ})$	e/D	p/e	$\phi \times 10^3$	β_*
Настоящо изследване	4030	13.73	0.781	8.20	68.0	0.057	7.45	7.663	0.775
	5010	13.68	0.797	7.57	80.0	0.058	9.50	6.134	0.889
	5020	13.64	0.772	6.26	81.7	0.056	8.11	6.980	0.908
	5030	13.51	0.767	5.19	83.0	0.057	6.77	8.390	0.922
	5040	14.04	0.797	8.73	78.8	0.057	10.95	5.182	0.875
	5050	13.99	0.744	6.55	81.5	0.053	8.80	6.041	0.905
	5060	14.00	0.578	4.78	83.8	0.041	8.27	4.992	0.931
	6010	14.12	1.256	11.71	75.2	0.089	9.32	9.541	0.836
	6020	14.02	1.122	10.56	76.5	0.080	9.41	8.503	0.850
	6030	13.98	1.073	9.194	78.2	0.077	8.57	8.958	0.869
Стъпки на лентата $H/D_i=7.7; 5.8; 4.7$									

$$f = c_f Re^m$$

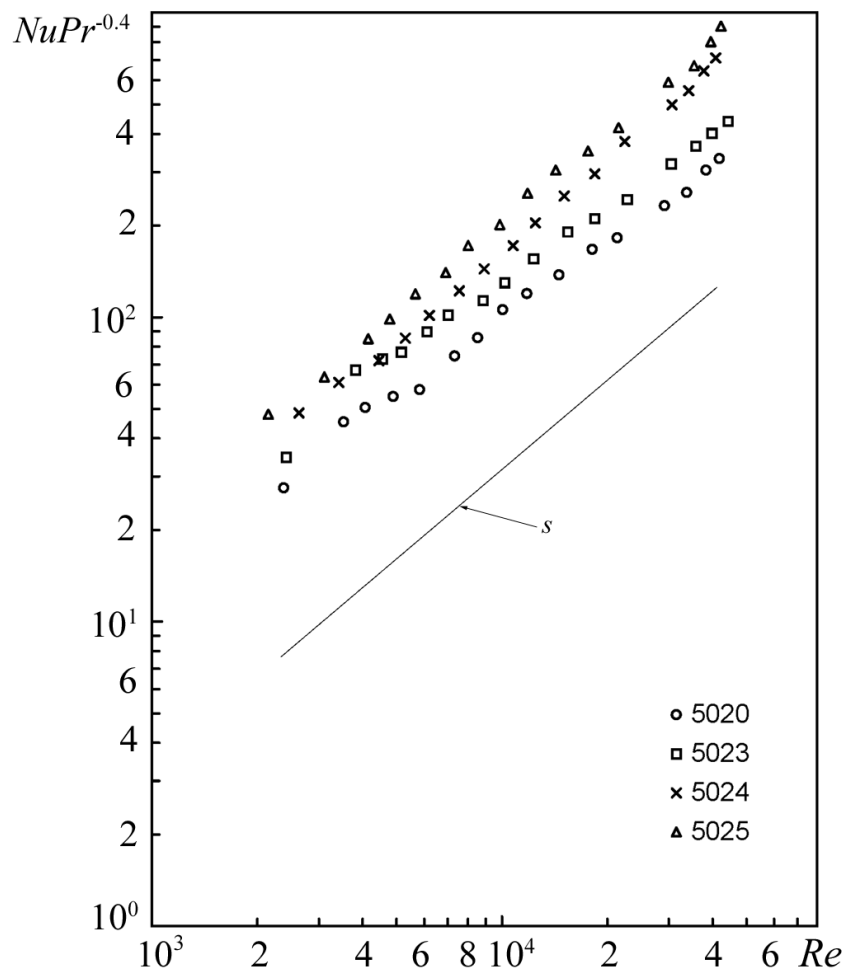
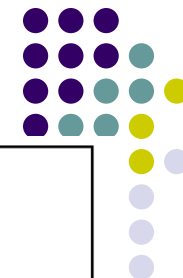
$$Nu_R Pr^{-0.4} = c_h Re^n$$



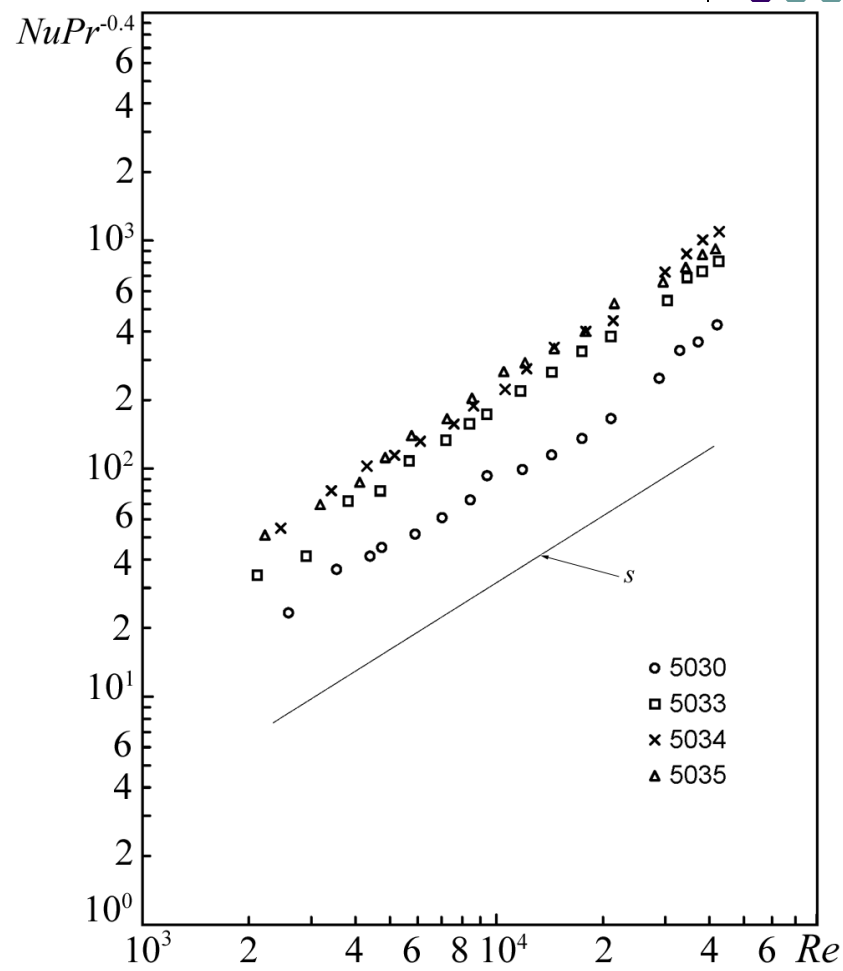
Изменение на f в зависимость от Re



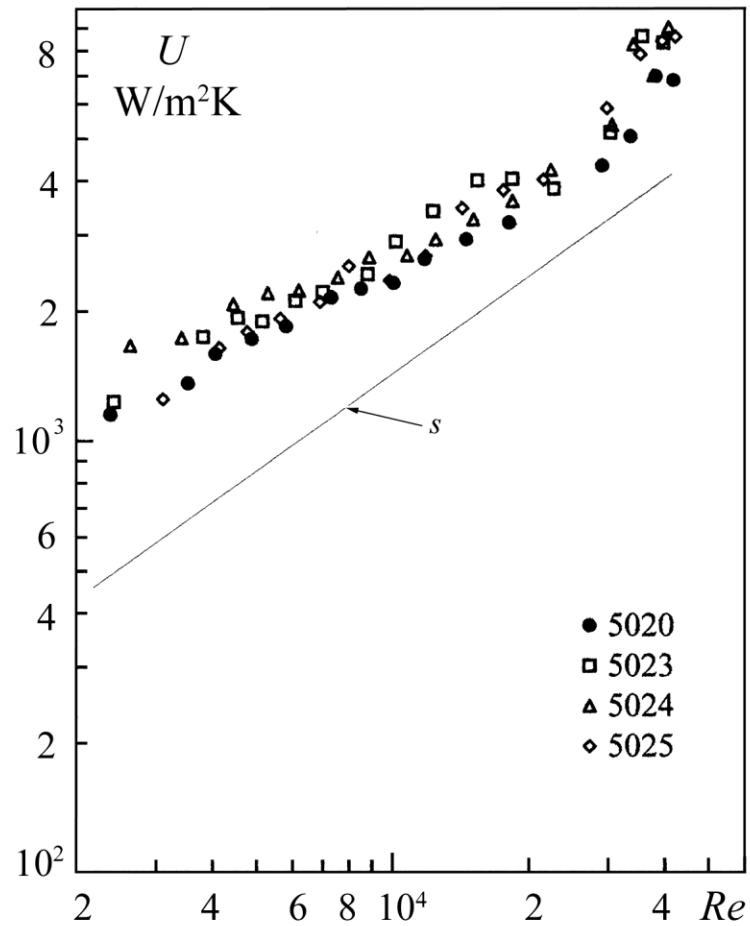
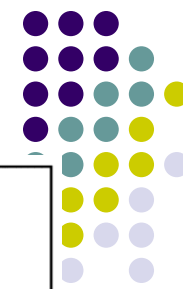
Изменение на f в зависимость от Re



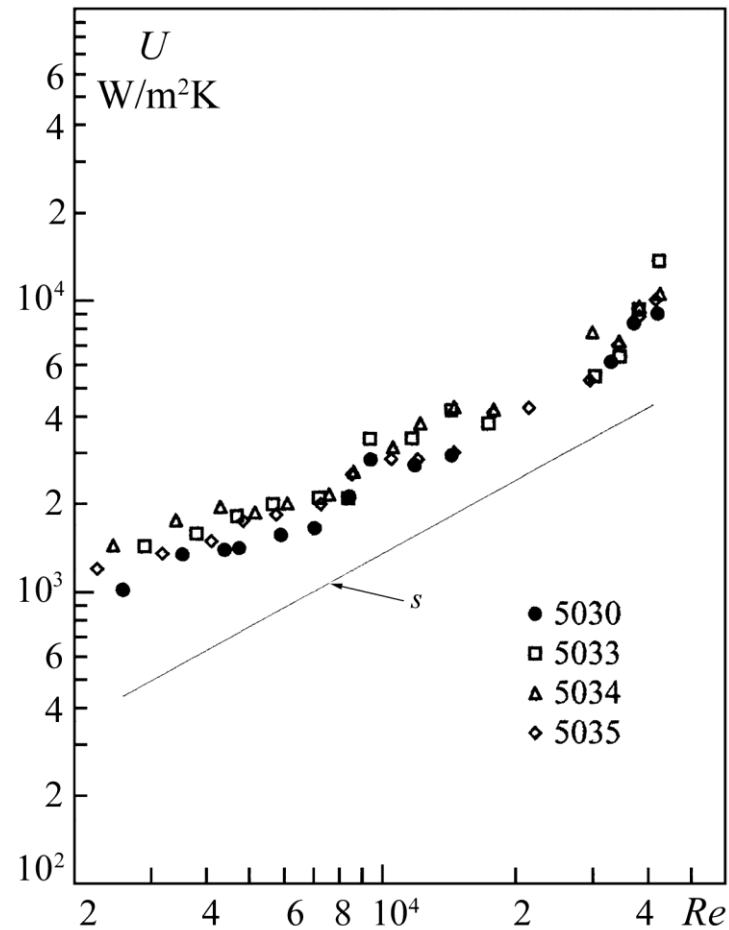
Изменение на $NuPr^{-0.4}$ в зависимость от Re



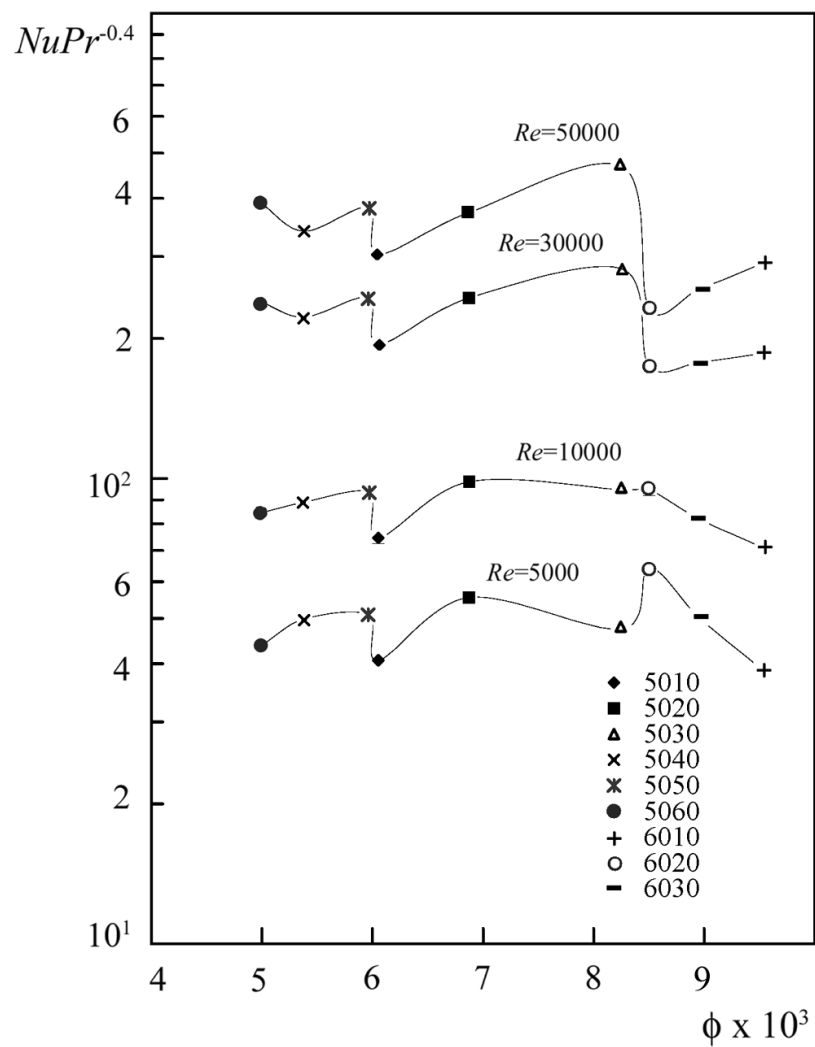
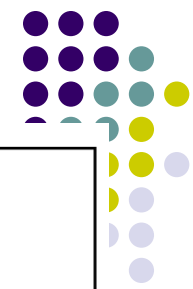
Изменение на $NuPr^{-0.4}$ в зависимость от Re



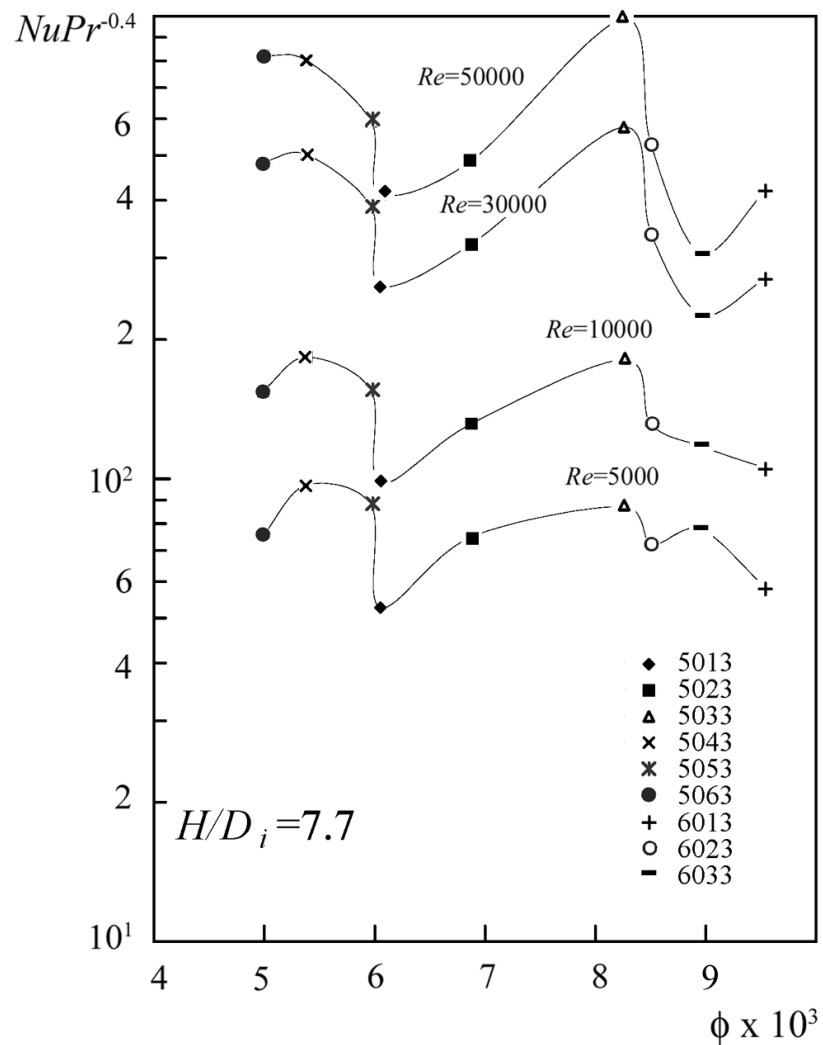
Изменение на U в зависимость от Re



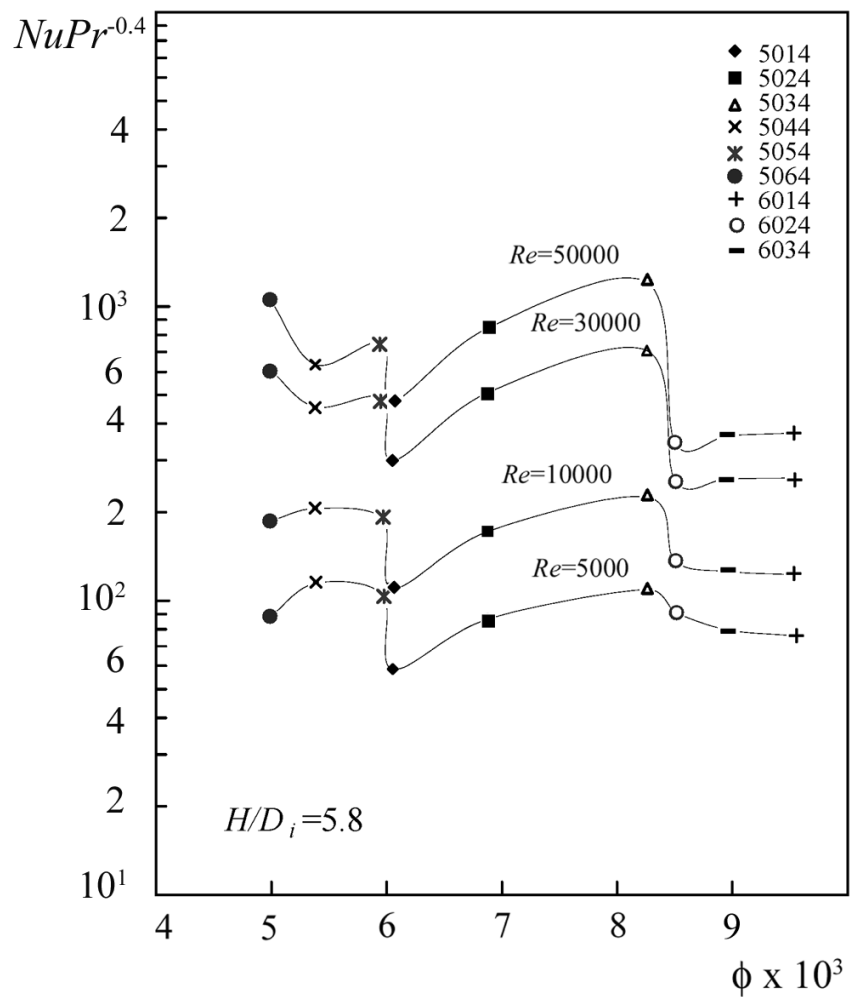
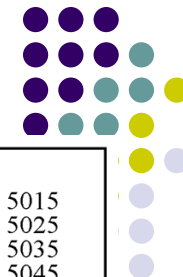
Изменение на U в зависимость от Re



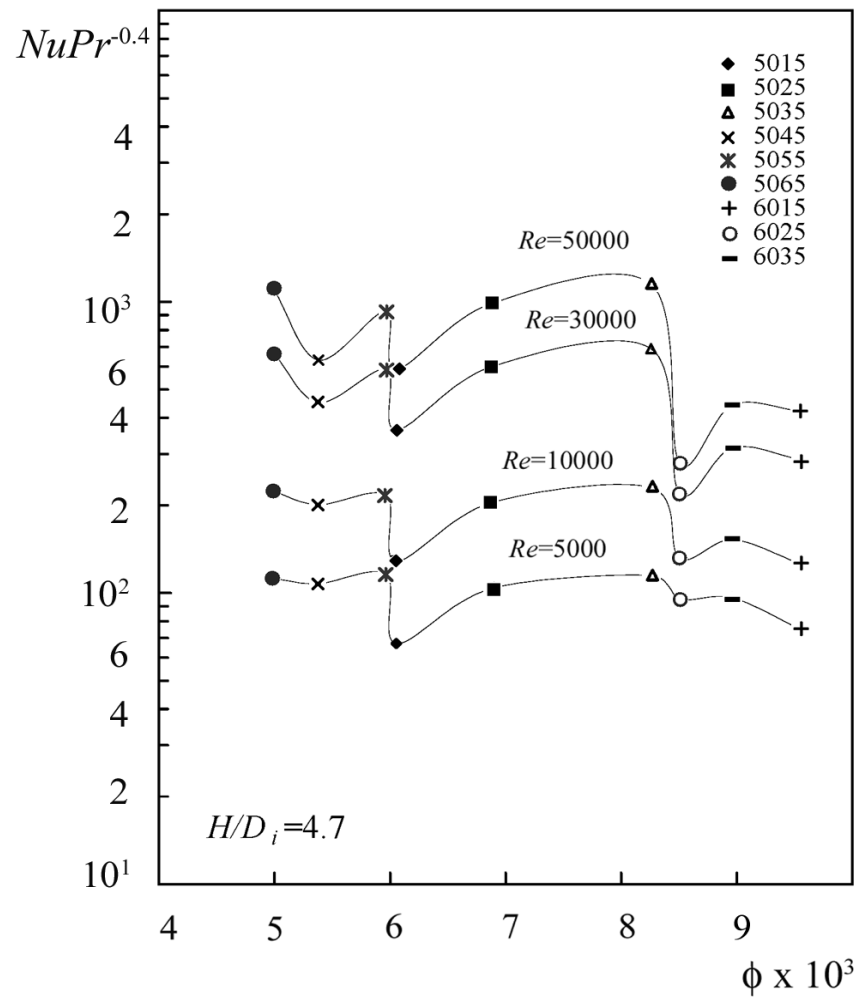
Изменение на $NuPr^{-0.4}$ от ϕ



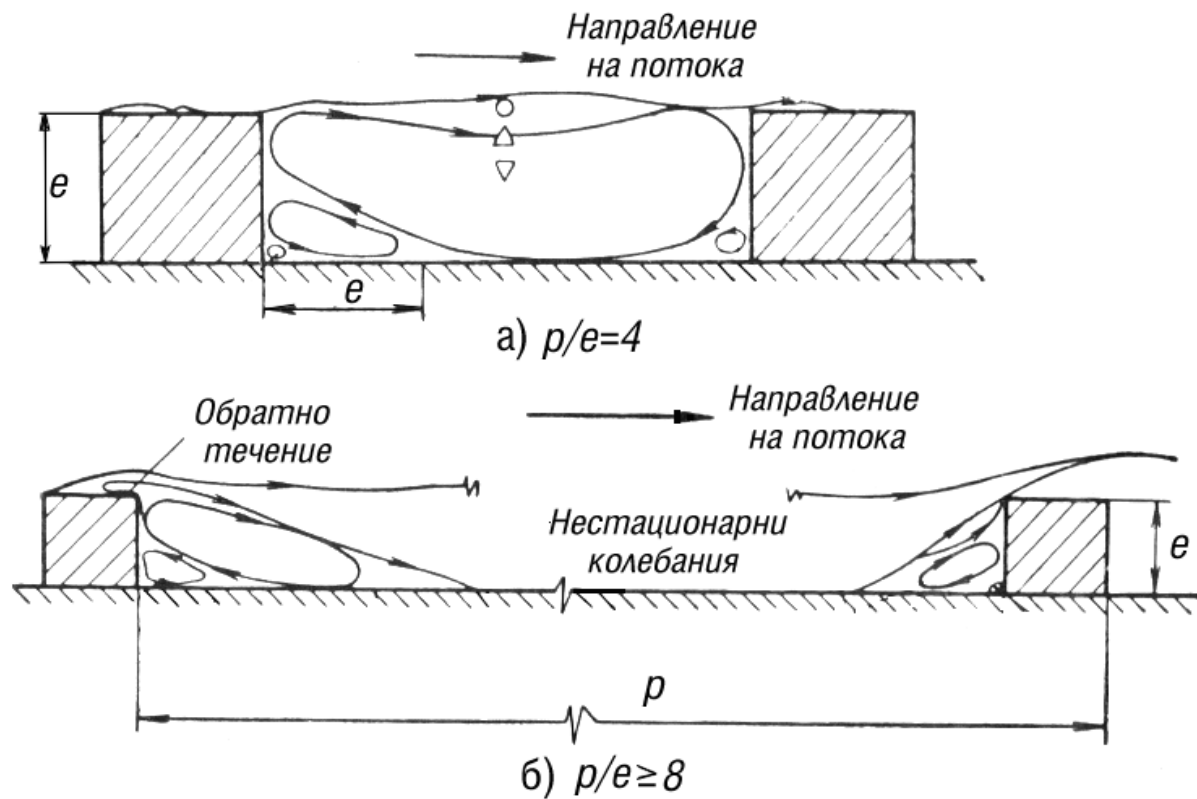
Изменение на $NuPr^{-0.4}$ от ϕ



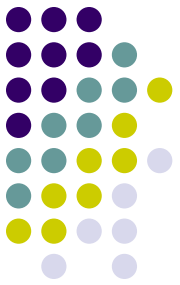
Изменение на $NuPr^{-0.4}$ от ϕ



Изменение на $NuPr^{-0.4}$ от ϕ



Структура на вихровите зони между турбулизаторите в граничния слой



$$E_f = 1 + 179.6 \text{Re}^{0.184} \phi^{0.784} (H / D_i)^{-0.178}$$

$$5 \times 10^3 < \text{Re} < 5 \times 10^4 \quad 4.992 \times 10^{-3} < \phi < 9.541 \times 10^{-3} \quad 4.7 < H / D_i < 7.7$$

No	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
162	122	75.3	23	14.2	12	7.4	5	3.1

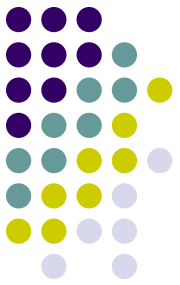
$$E_f = 1 + 13.567 \text{Re}^{0.184} \phi^{0.784} \left[(H / D_i)^3 - 18.151 (H / D_i)^2 + 107.46 (H / D_i) - 198 \right]$$

No	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
162	128	79.0	19	11.7	15	9.3	-	-

$$E_f = 1 + 131.1 \text{Re}^{0.184} \phi^{0.784}$$

$$p/e \leq 9.0 \quad 0.041 \leq e/D_i \leq 0.077 \quad 5 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^4$$

$$E_{h,i} = 1 + 130.4 \text{Re}^{-0.110} (e/D_i)^{-1.227} (p/e)^{-2.010} (H/D_i)^{-0.956}$$



N	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
105	42	40.0	28	26.7	16	15.2	19	18.1

$$\text{Re} < 10^4$$

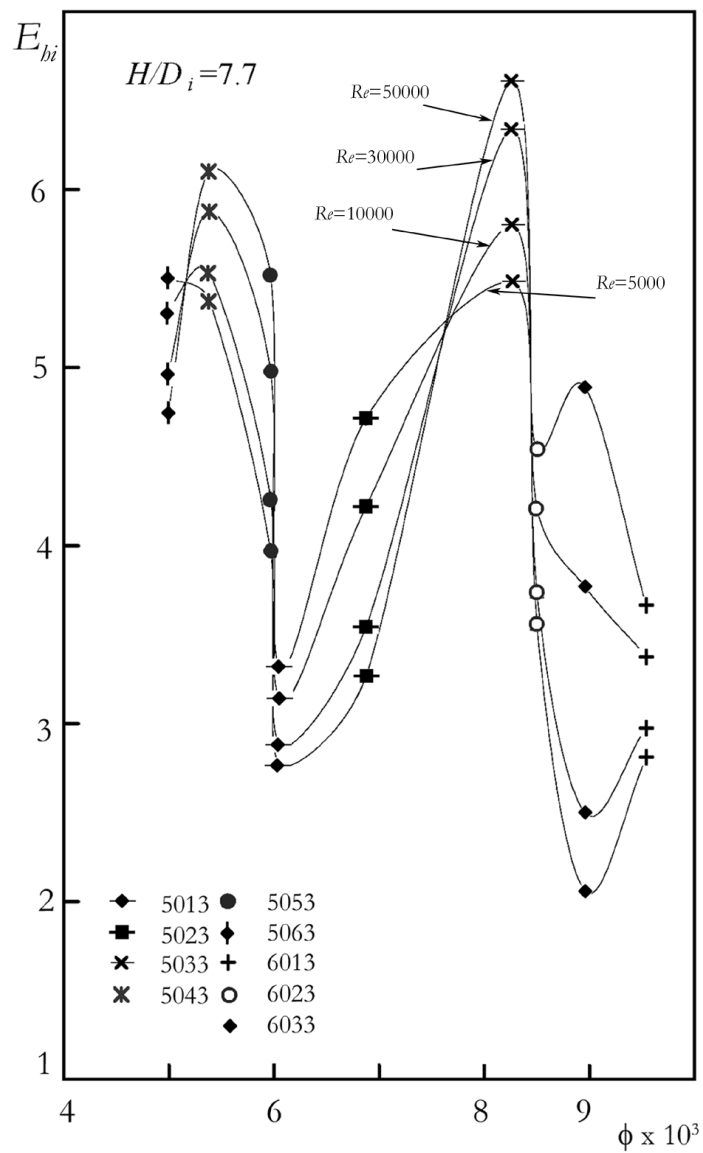
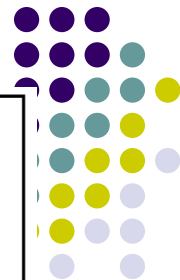
$$E_{h,i} = 1 + 129.4 \text{Re}^{-0.110} (e/D_i)^{-1.406} (p/e)^{-2.212} (H/D_i)^{-1.001}$$

N	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
90	40	44.4	24	26.7	14	15.6	12	13.1

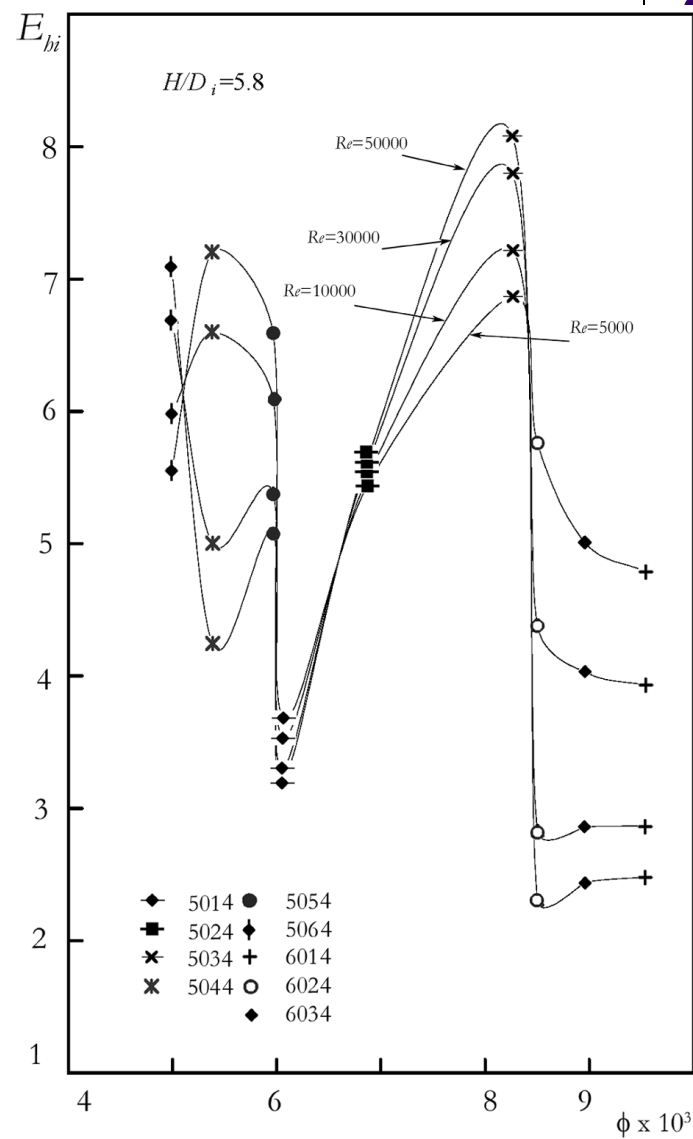
$$p/e > 9.0$$

$$E_{h,i} = 1 + 4.757 \times 10^{-4} \text{Re}^{-0.269} (e/D_i)^{0.107} (p/e)^{5.099}$$

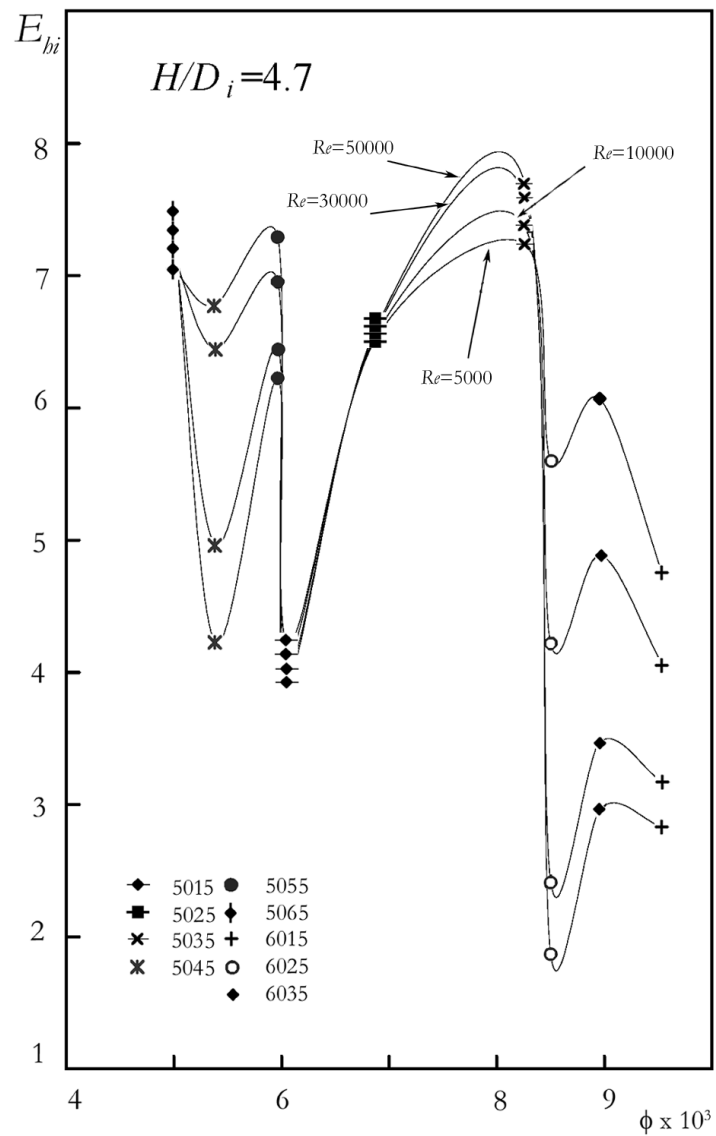
N	<±10%	%	±10% ÷ ±15%	%	±15% ÷ ±20%	%	>±20%	%
84	50	59.5	11	13.1	8	9.5	15	17.9



Изменение на E_{hi} от ϕ

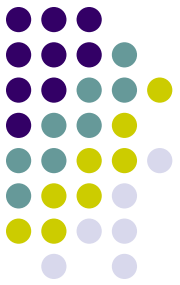


Изменение на E_{hi} от ϕ



Изменение на E_{hi} от ϕ

ИНТЕНЗИФИКАЦИЯ НА ТОПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНЗАЦИЯ НА НЕПОДВИЖНА ВОДНА ПАРА ВЪРХУ ПОВЪРХНОСТТА НА ХОРИЗОНТАЛНИ ВАЛЦОВАНИ ТРЪБИ



$$Re_l = \frac{4\Gamma}{\mu_f} = \frac{4\rho_f^2 \delta^3 g}{3\mu_f^2}$$

$$\bar{\alpha}_o = 1.47 \left(\frac{k_f^3 g}{v_f^2} \right)^{1/3} Re_l^{-0.333}$$

$$\delta = \left(\frac{3\mu_f^2}{4\rho_f^2 g} \right)^{1/3} Re_l^3$$

$$\Phi = \left(\frac{k_f^3 g}{v_f^2} \right)^{1/3}$$

$$\alpha_o = \left(\frac{4k_f^3 g}{3v_f^2} \right)^{1/3} Re_l^{-0.333}$$

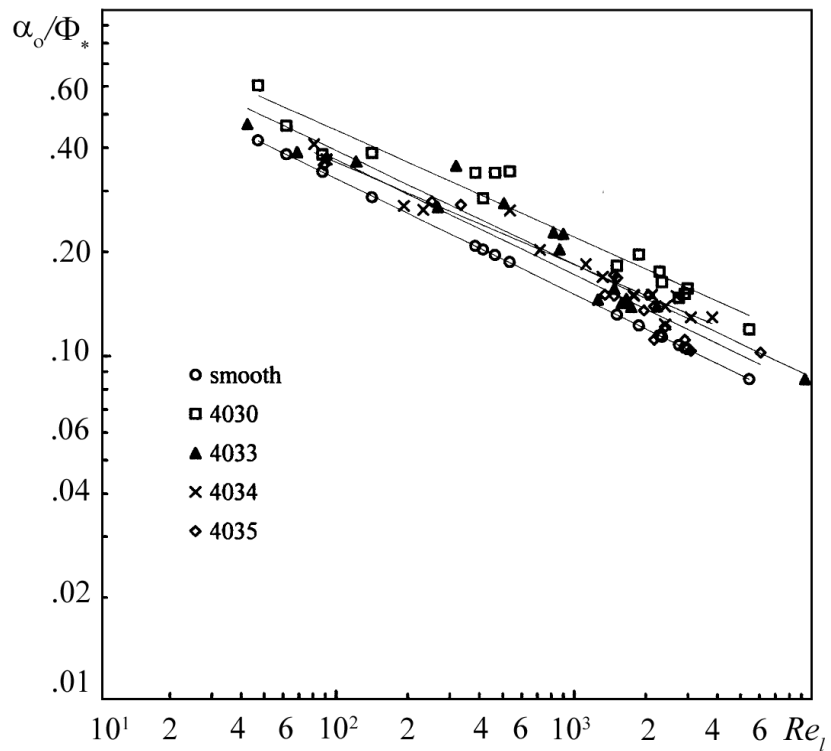
$$\alpha_o^+ = \frac{\bar{\alpha}}{\Phi} = 1.47 Re_l^{-0.333}$$

$$\bar{\alpha} = 4/3\alpha$$

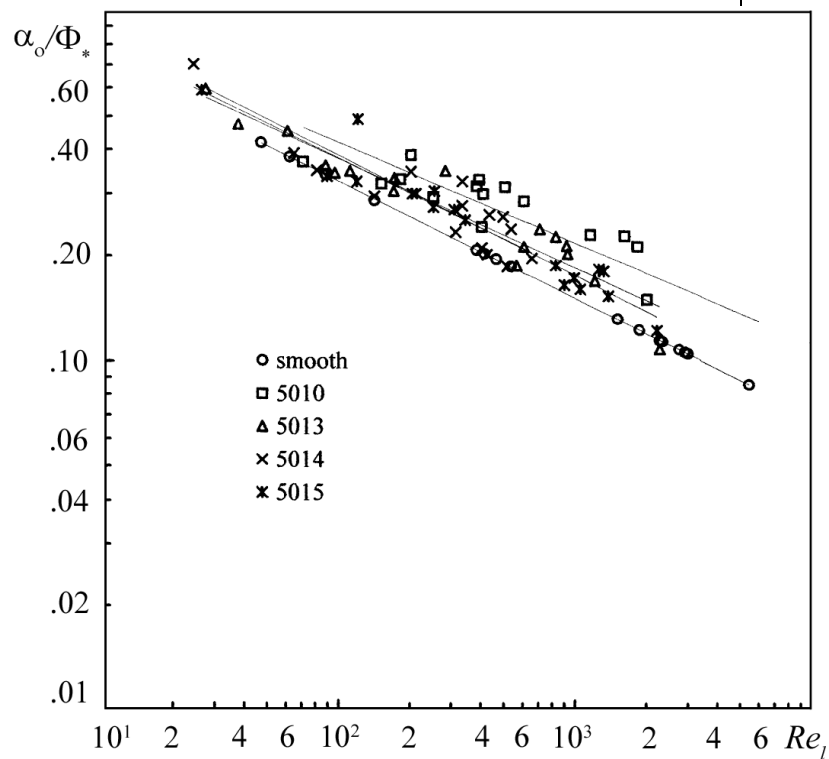
$$\alpha_o^+ = 1.51 Re_l^{-0.333}$$

$$\alpha_{o,R}^+ = c_{h,o} Re_l^{-n}$$

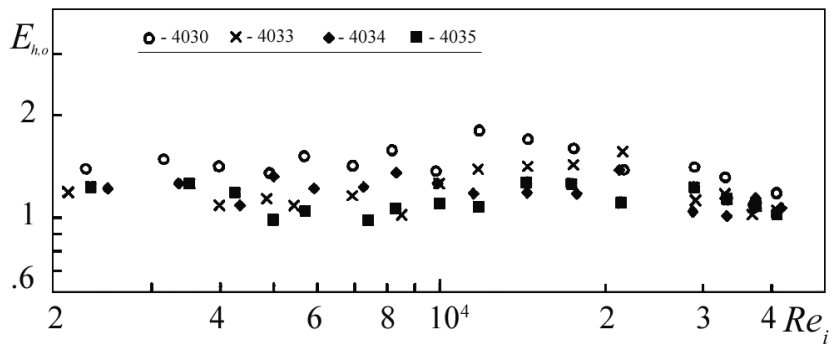
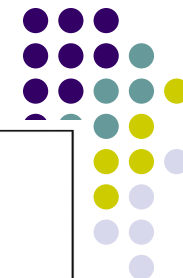
Екпериментални резултати



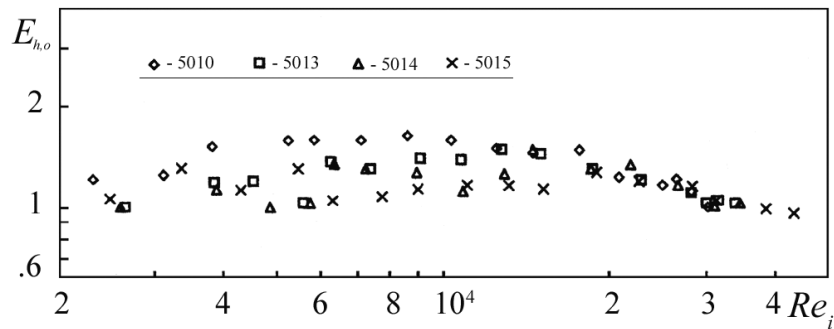
Изменение на α_o/Φ_* в зависимост от Re_l



Изменение на α_o/Φ_* в зависимост от Re_l

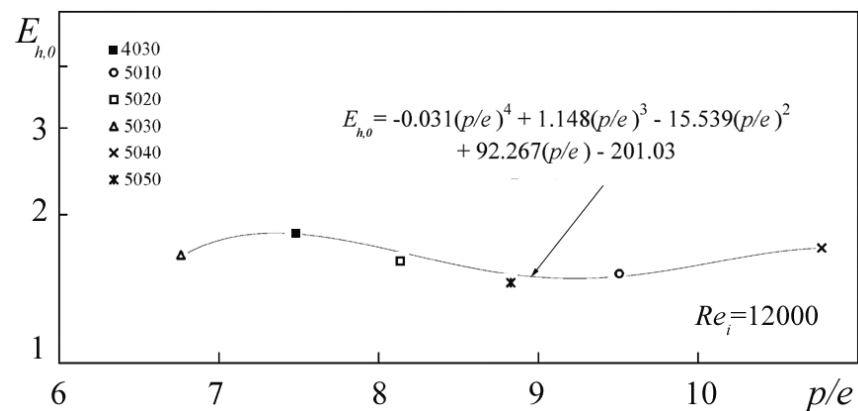


Изменение на $E_{h,o}$ в зависимость от Re_i

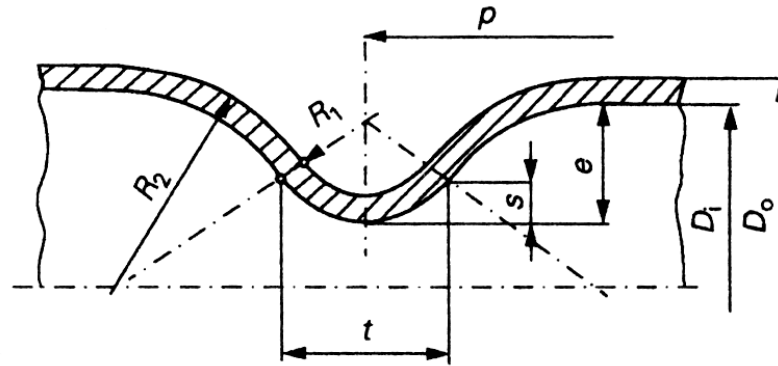
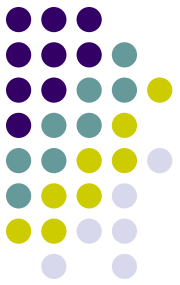


Изменение на $E_{h,o}$ в зависимость от Re_i

$$E_{h,o} = a + b Re_i + c Re_i^2 + d Re_i^3 + e Re_i^4$$



Изменение на $E_{h,o}$ в зависимость от p/e

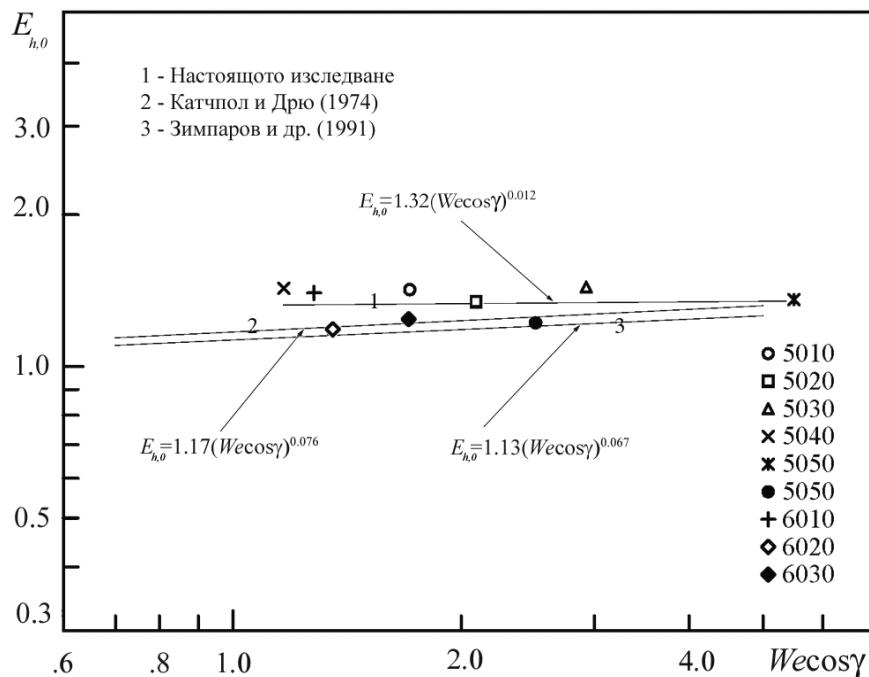


Геометрични параметри на изследваните тръби

$$We = \frac{\sigma}{\rho g p} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

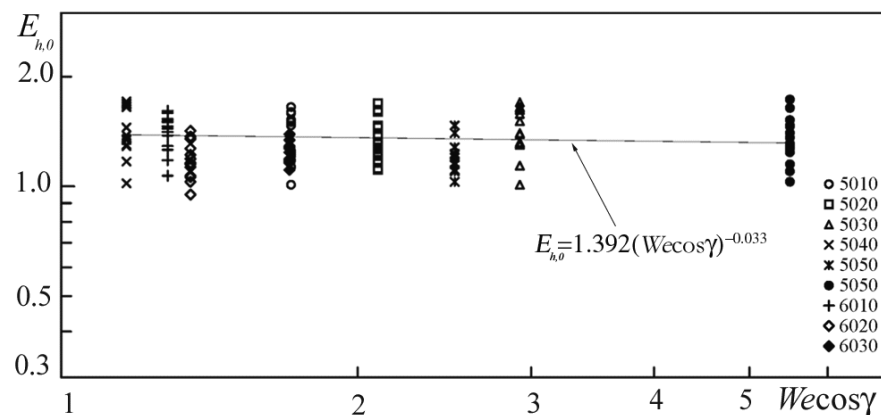
$$R_1 = 0.5s \left[1 + 0.25(t/s)^2 \right] - \delta_w \quad R_2 = 0.5(e-s) \left[1 + 0.25(t/s)^2 \right] + \delta_w$$

$$E_{h,o} = f(We \cos \gamma)$$

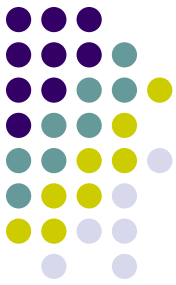


Изменение на E_0 в зависимост от $Wecos\gamma$

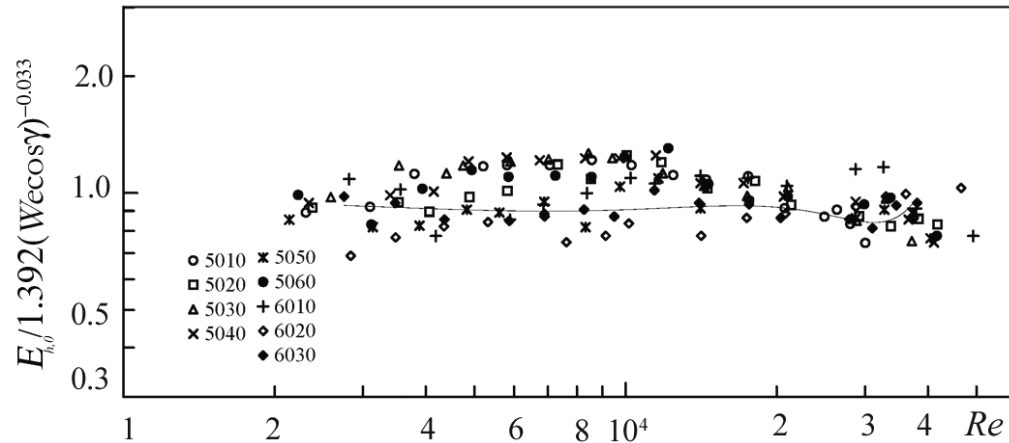
$$E_0 = 1.392(We \cos \gamma)^{-0.033}$$



Изменение на E_0 в зависимост от $Wecos\gamma$ при различни стойности на Re



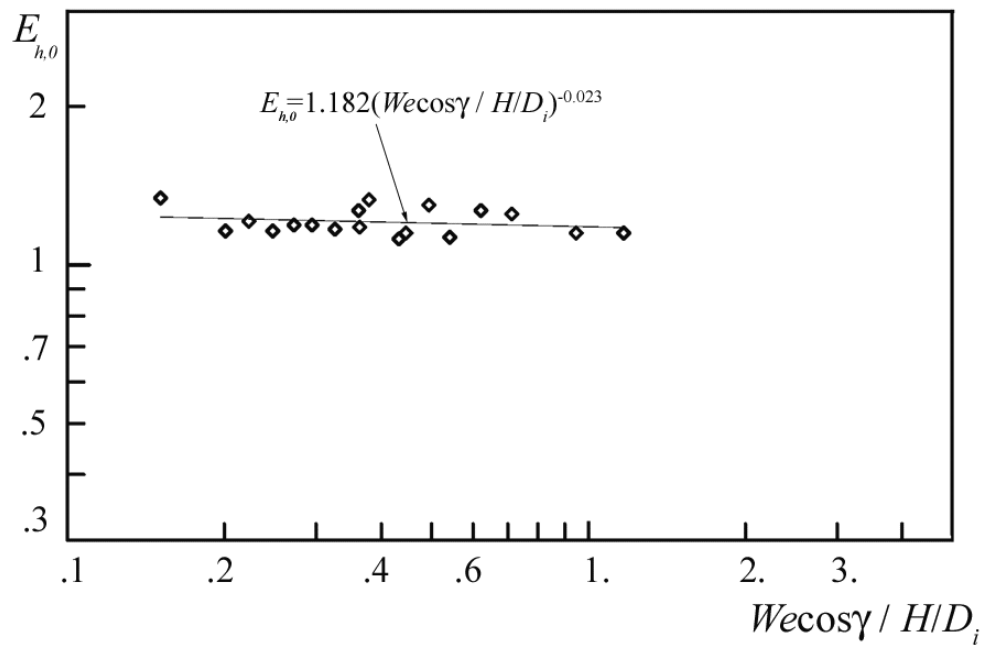
$$E_o = f(We, Re_i, \cos \gamma)$$



**Изменение на E_o в зависимост от $We \cos \gamma$
при различни стойности на Re**

$$E_o = 1.392 \left[(We \cos \gamma)^{-0.033} \times \left(0.771 + 7 \times 10^{-5} Re - 5 \times 10^{-9} Re^2 + 1 \times 10^{-13} Re^3 - 1 \times 10^{-18} Re^4 \right) \right]$$

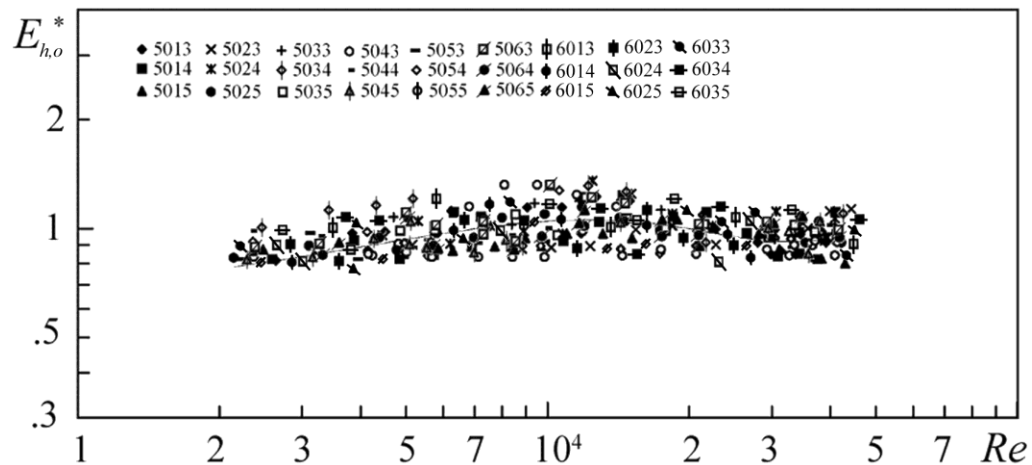
$$E_o = f(We, Re_i, H / D_i, \cos \gamma)$$



Изменение на $E_{h,0}$ в зависимости от $\frac{We \cos \gamma}{H / D_i}$

$$E_0 = 1.182 \left(\frac{We \cos \gamma}{H / D_i} \right)^{-0.023}$$





Изменение на $E_{h,o}^*$ в зависимость от Re

$$E_{h,o} = \left(\frac{We \cos \gamma}{H / D_i} \right)^{-0.023} \times \left(0.957 + 4.728 \times 10^{-5} Re_i - 2.364 \times 10^{-9} Re_i^2 + 3.546 \times 10^{-14} Re_i^3 - 1.064 \times 10^{-19} Re_i^4 \right)$$

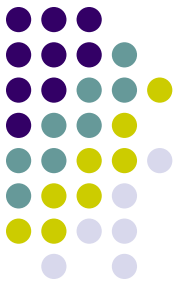
Анализ на получените оценки за термодинамична ефективност по Първия и Втория закон на термодинамиката



- *Случаи FG-1*
- *Ограничения: $\Delta T_i^*=1$, $W_*=1$, $N_*=1$, $L_*=1$;*
- *Изискват: $P_*>1$.*

$$P_* = f_* D_*^{-5}$$

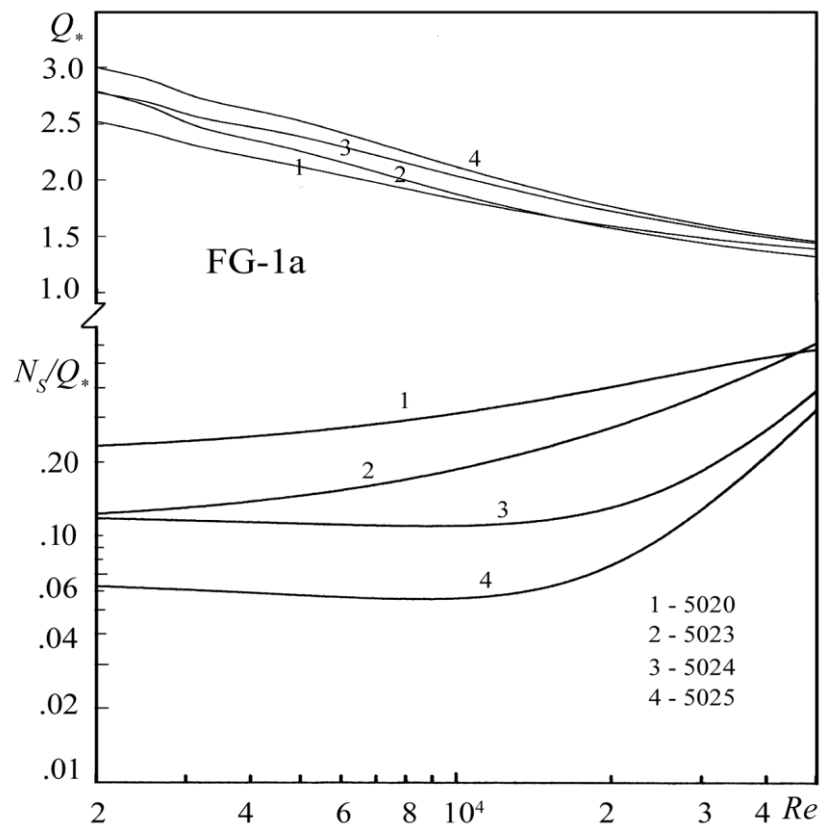
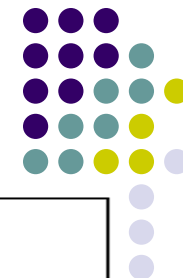
$$\frac{(U_i A_i)_R}{(U_i A_i)_S} = \frac{1 + R_S}{\frac{St_S}{St_R} D_* + R_R D_*^{-1}}$$



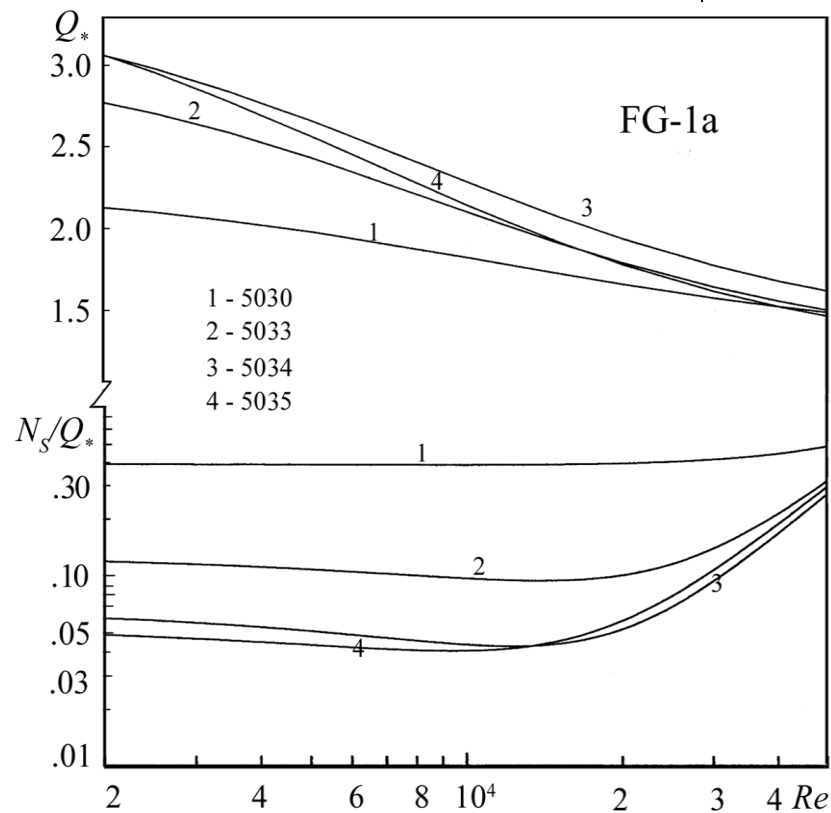
- **Случай FG-1a**
- **Цел: $Q_* > 1, N_s < 1$.**

$$Q_* = \varepsilon_*$$

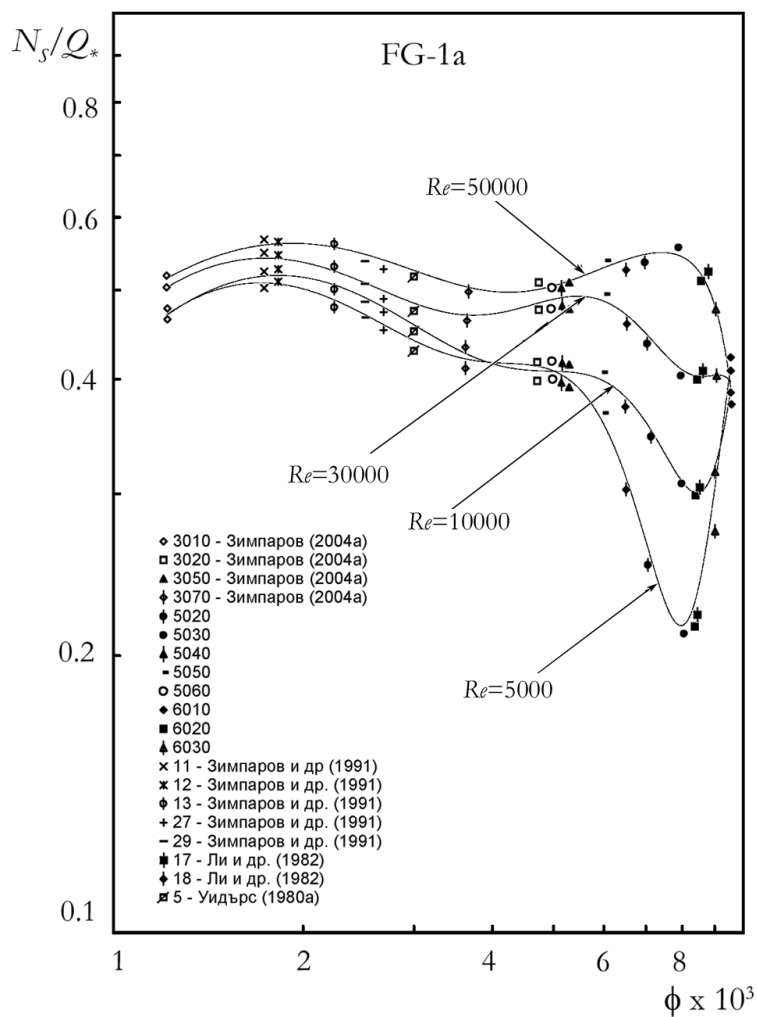
$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(Q_* \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_S} D_*^{-0.8} \right) \right) \left(\frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} + Q_* \left(1 - \frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} \right) \right)^{-1} + \phi_o \frac{f_R / f_S}{D_*^{4.75}} \right) = f(Re)$$



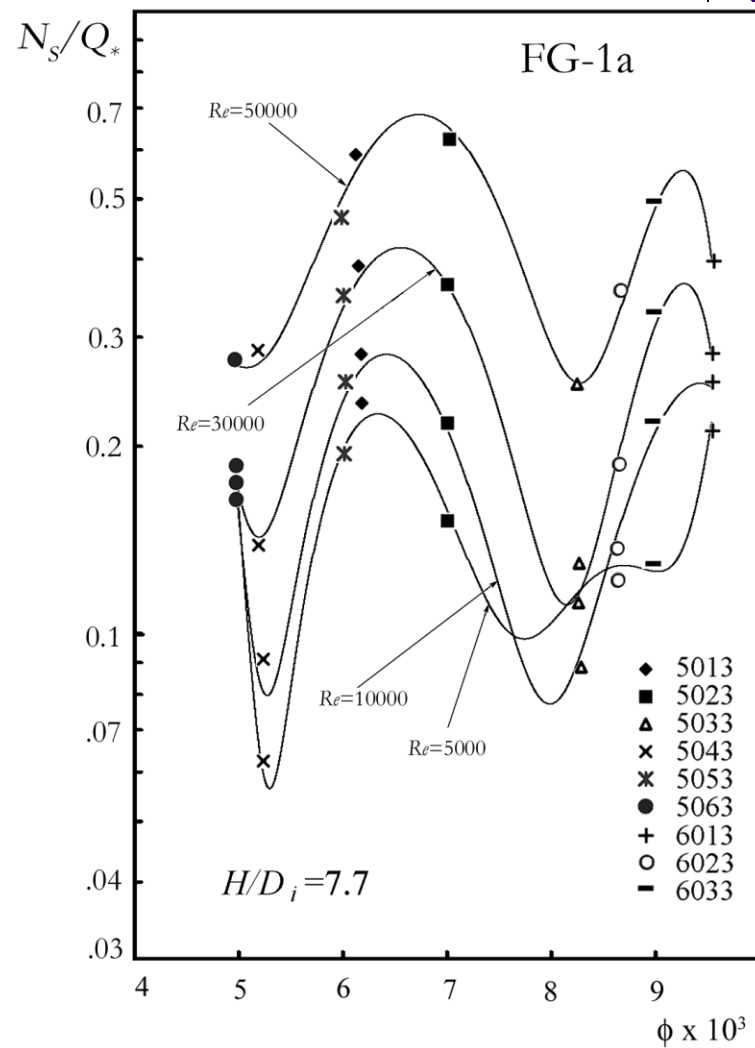
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re



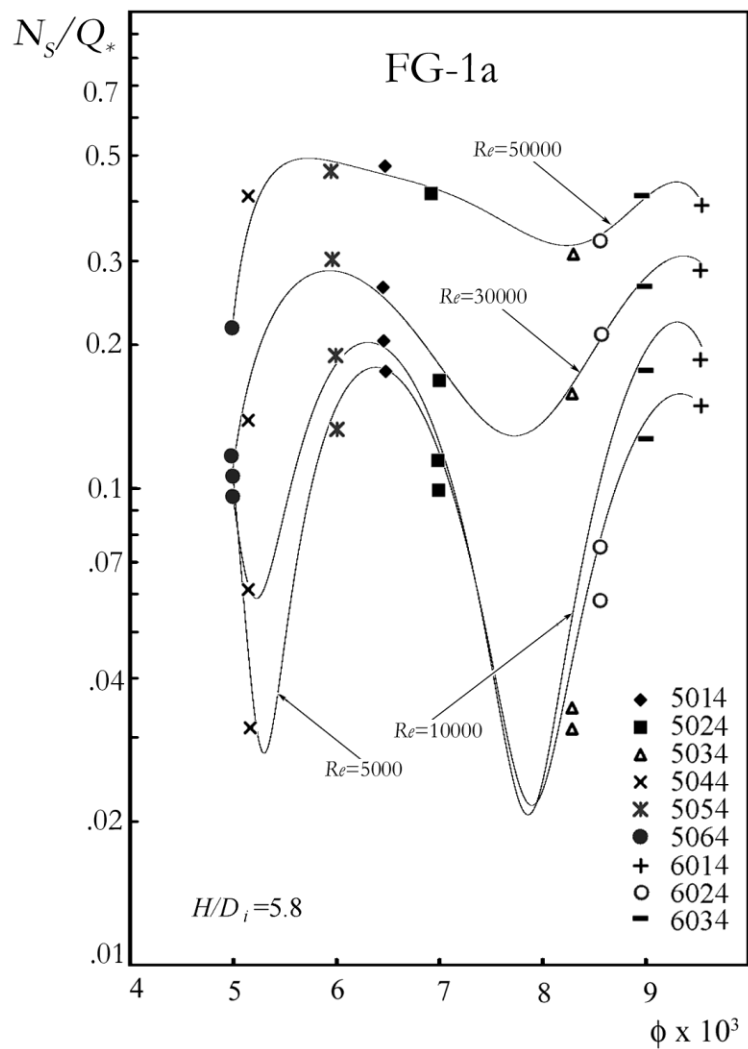
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re



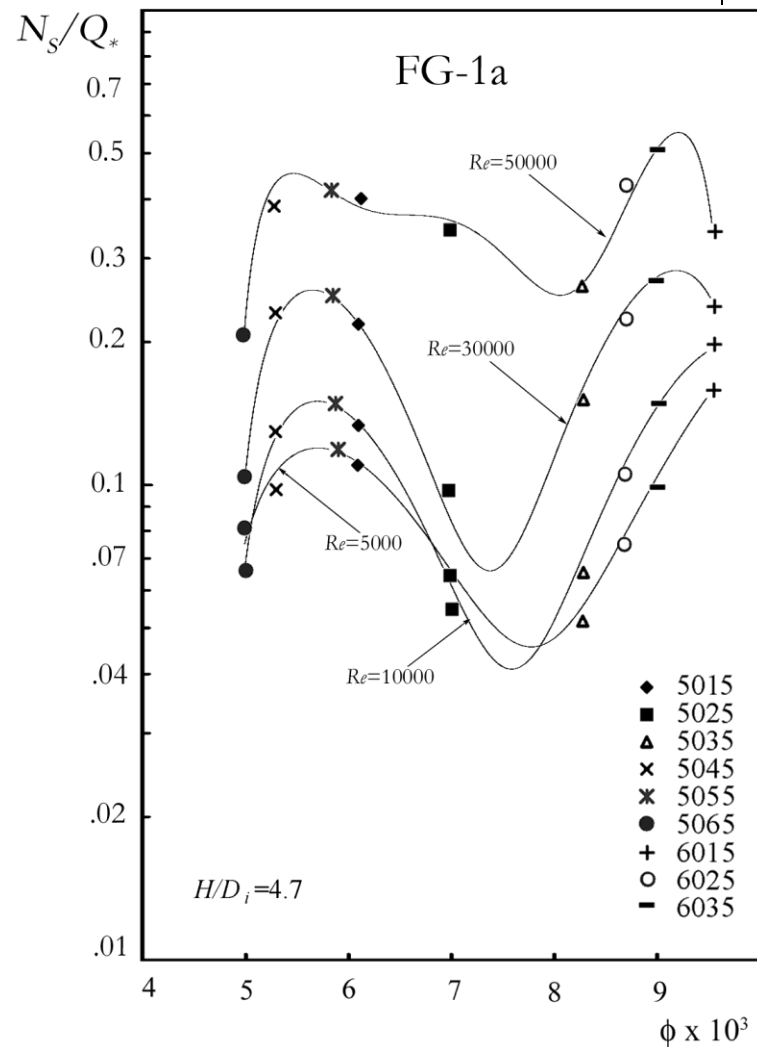
Изменение на N_s/Q_* от ϕ



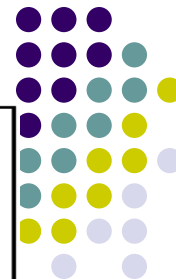
Изменение на N_s/Q_* от ϕ

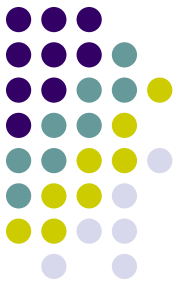


Изменение на N_s/Q_* от ϕ



Изменение на N_s/Q_* от ϕ



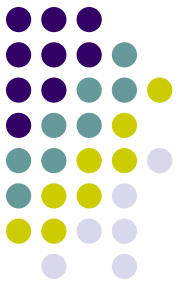


- **Случаи FG-2**
- **Ограничения: $\Delta T_i^*=1, N_*=1, L_*=1, P_*=1$;**
- **Изискват: $W_* < 1$.**

$$W_* = f_*^{-1/3} D_*^{5/3}$$

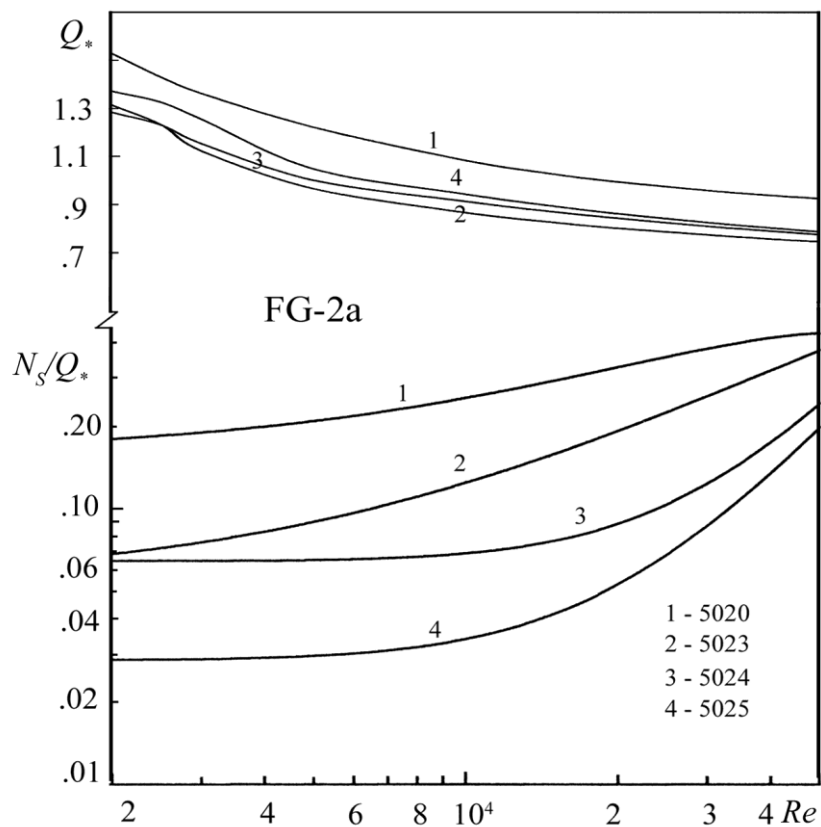
$$\frac{(U_i A_i)_R}{(U_i A_i)_S} = \frac{1 + R_S}{\frac{St_S}{St_R} (f_* D_*^{-2})^{1/3} + R_R D_*^{-1}}$$

- **Случай FG-2a**
- **Цел: $Q_* > 1, N_s < 1$**

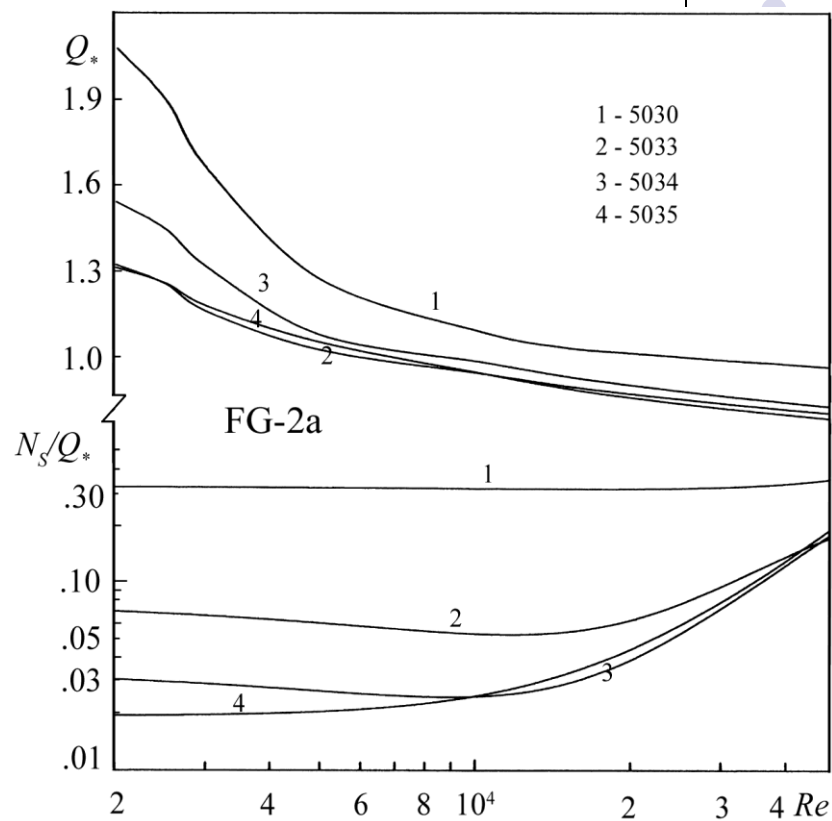


$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(Q_* \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_S} (f_R / f_S)^{0.073} D_*^{-1.145} \right) \right) \times \right.$$

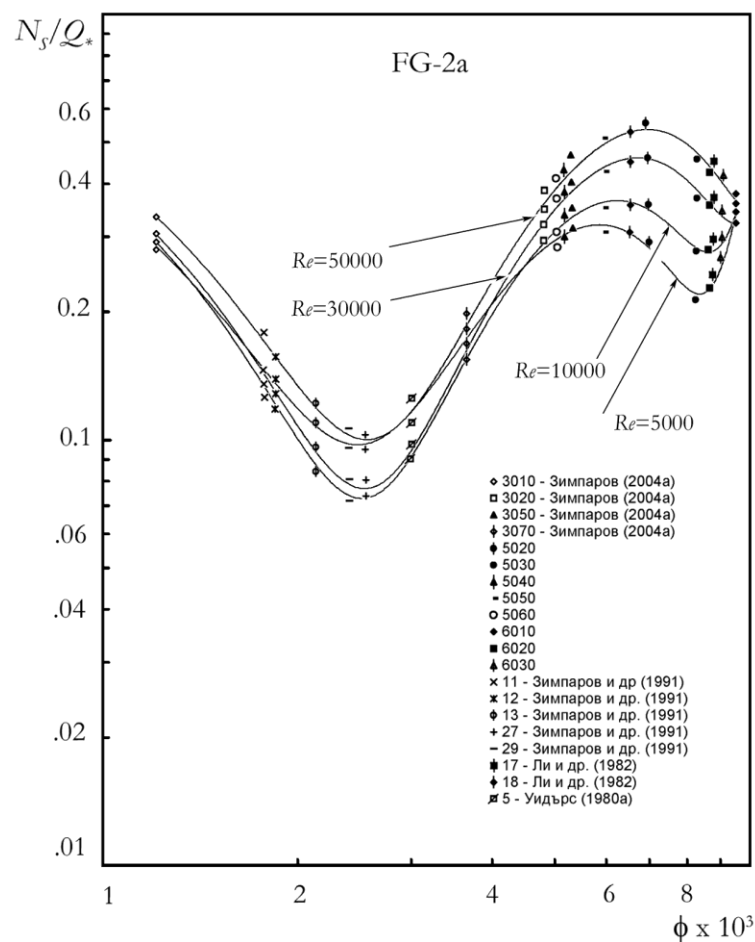
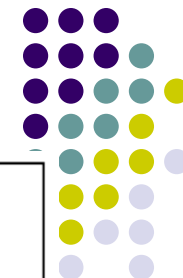
$$\left. \left[\frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} + Q_* (f_R / f_S)^{0.364} D_*^{-1.727} \left(1 - \frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} \right) \right]^{-1} + \phi_o \right) = f(Re_R)$$



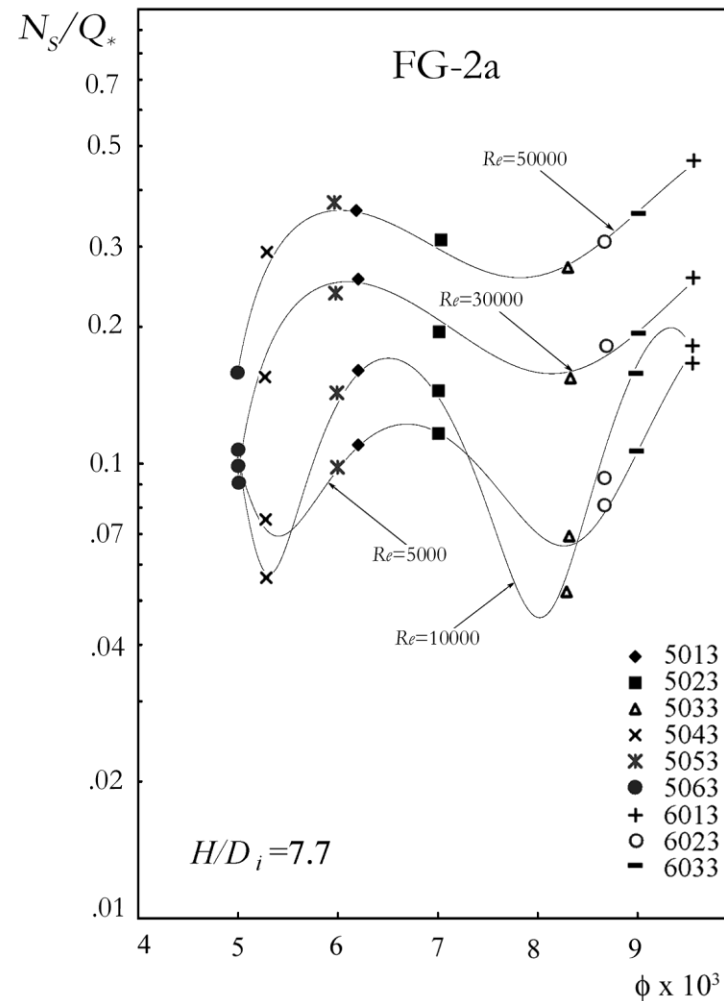
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re



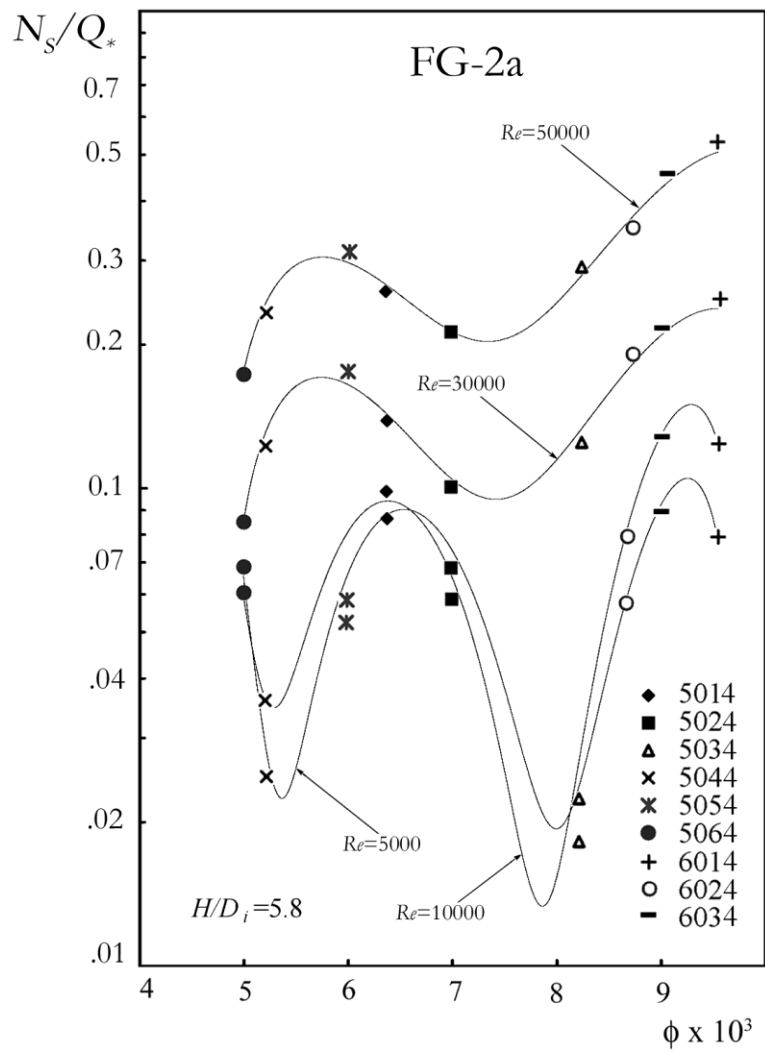
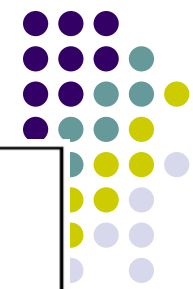
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re



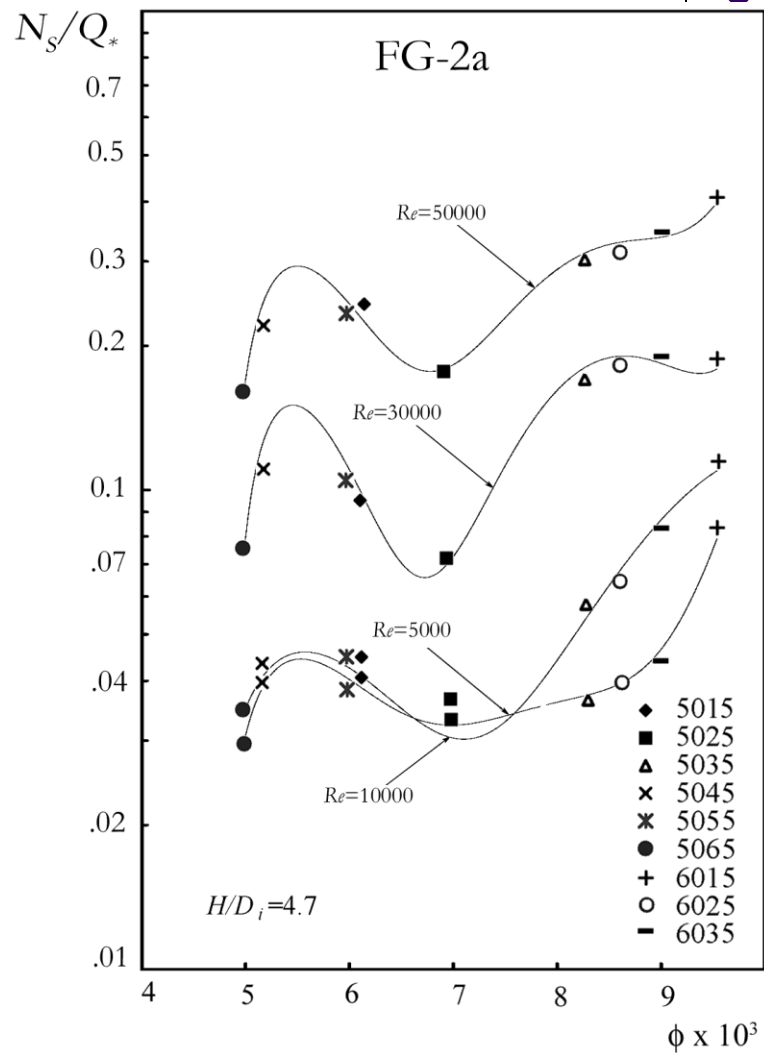
Изменение на N_s/Q_* от ϕ



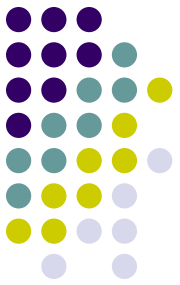
Изменение на N_s/Q_* от ϕ



Изменение на N_s/Q_* от ϕ



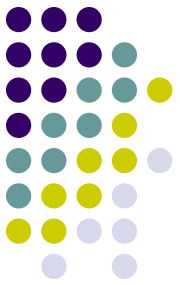
Изменение на N_s/Q_* от ϕ



- **Случаи VG**
- **Ограничения: $\Delta T_i^*=1, W_*=1, N_*>1, L_*<1, P_*=1$.**

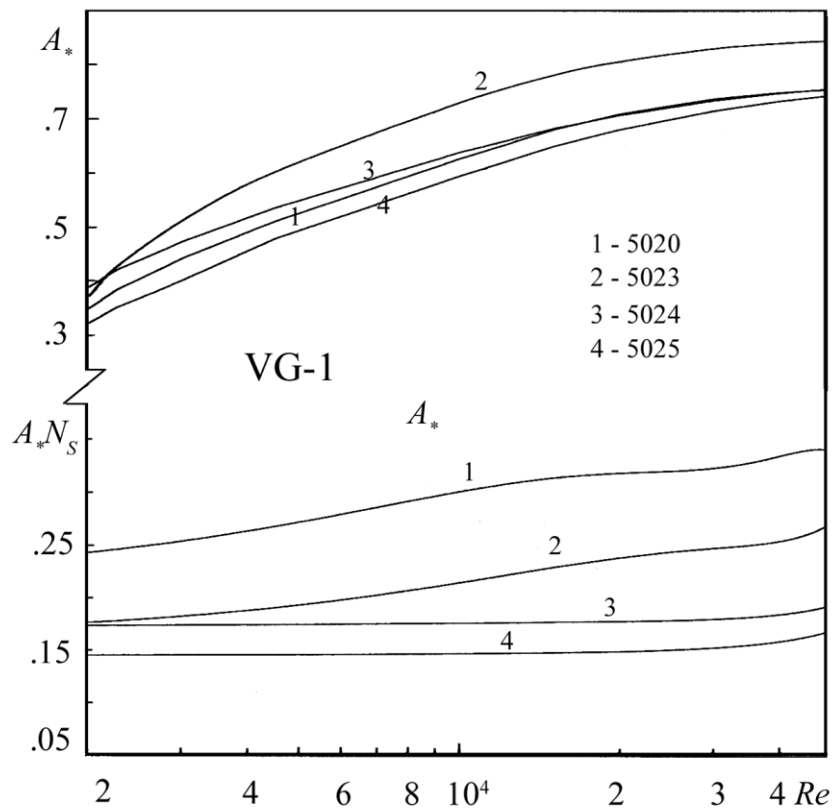
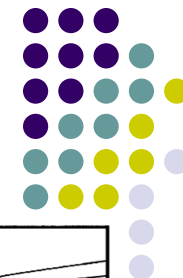
$$1 = \frac{1 + R_S}{\frac{St_S}{St_R} \left(f_* A_*^{-2} \right)^{2/3} + R_R A_*^{-1}}$$

$$1 = f_* L_*^3 A_*^{-2} D_*^{-3}$$

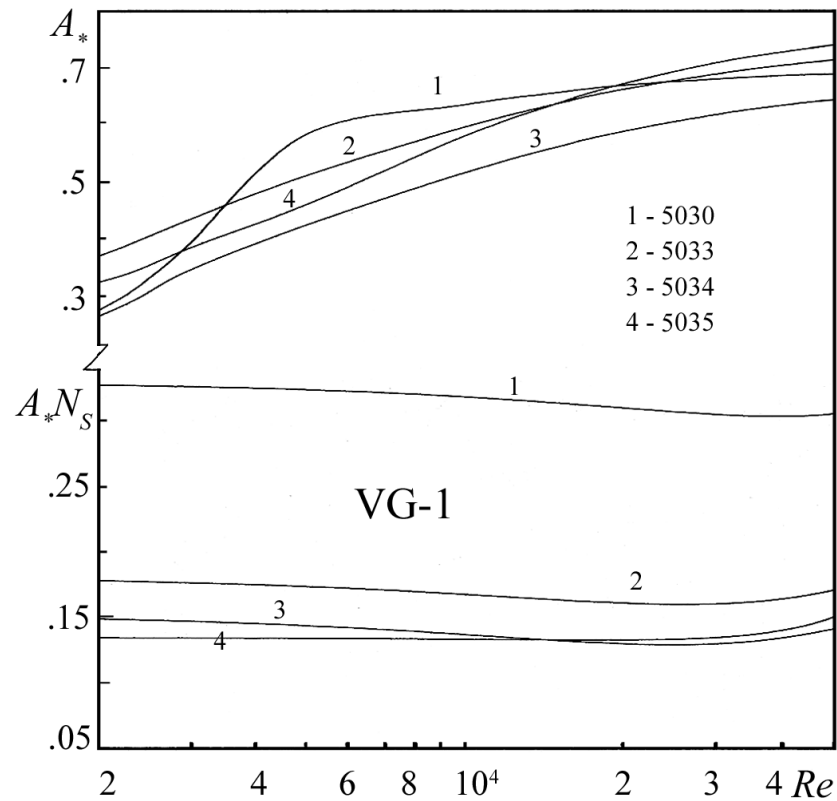


- **Случай VG-1**
- **Цел: $A_* < 1, N_s < 1$**

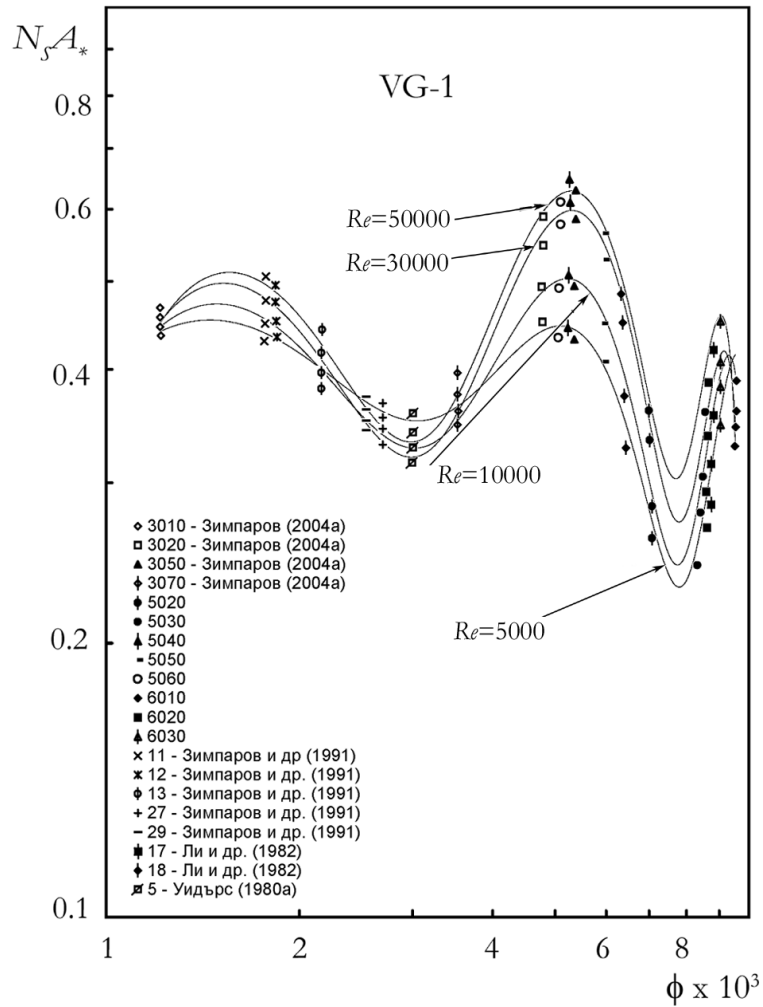
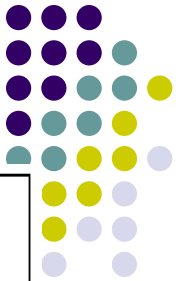
$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left(\left(\frac{f_R}{f_s} A_* \right)^{-0.364} D_*^{2.091} \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_s} (f_R / f_s)^{-0.291} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. A_*^{0.709} D_*^{-0.127} \right) \right) + \phi_o / N_* \right) = f(Re_R)$$



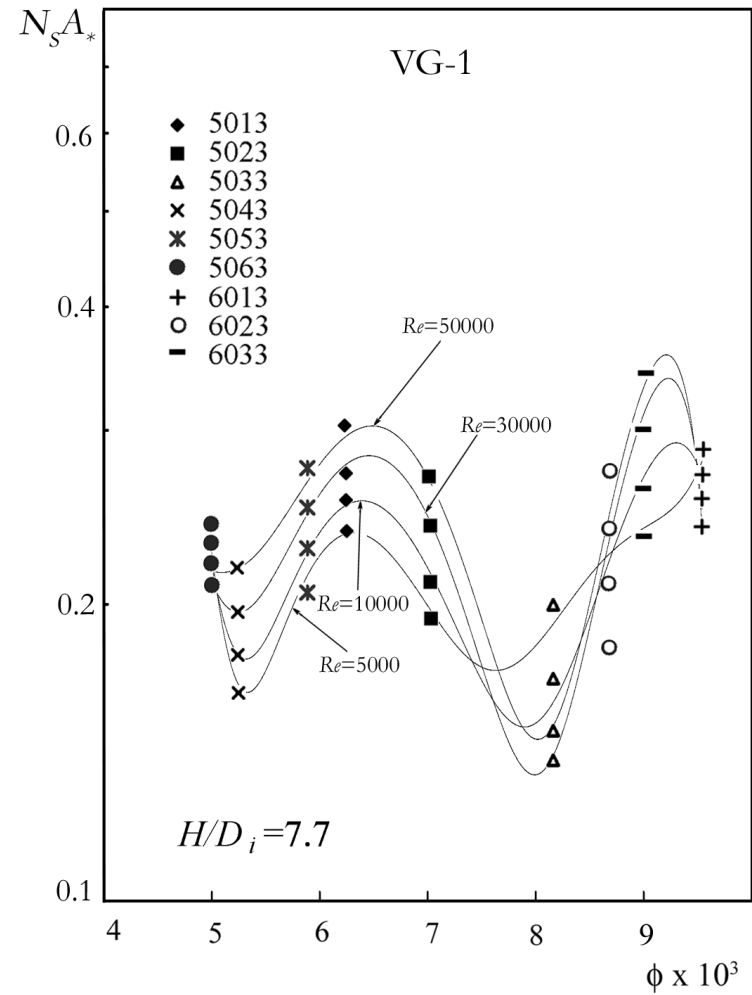
Изменение на A_* и $N_s A_*$ от Re



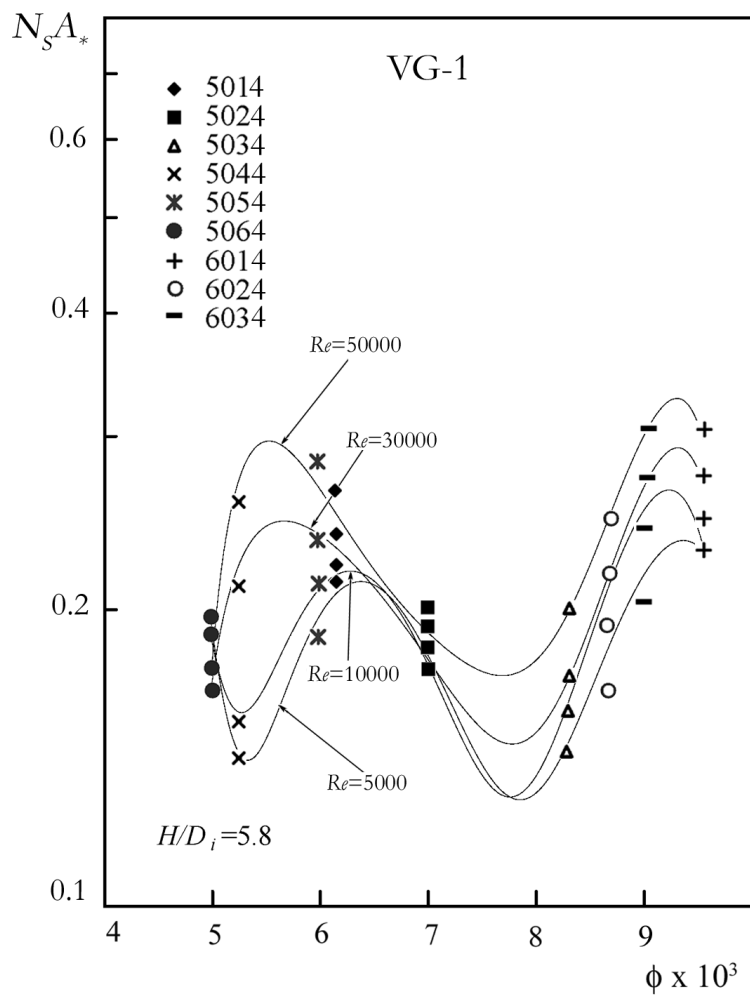
Изменение на A_* и $N_s A_*$ от Re



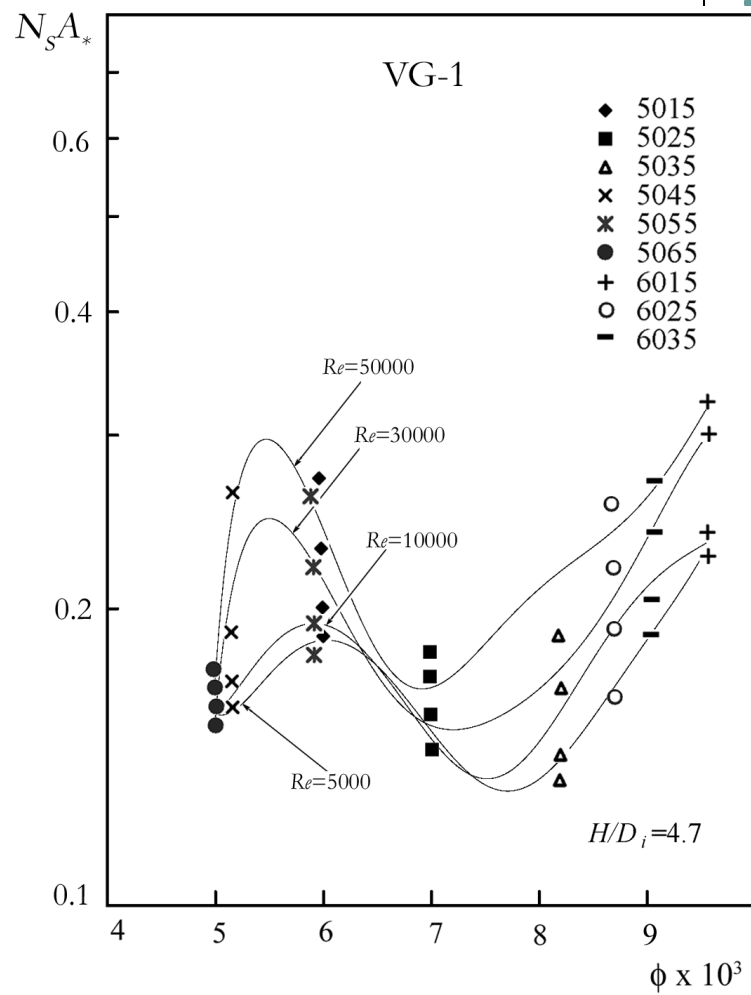
Изменение на $N_s A_*$ от ϕ



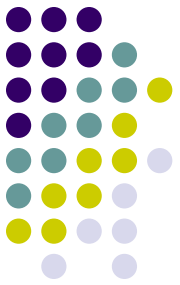
Изменение на $N_s A_*$ от ϕ



Изменение на $N_S A_*$ от ϕ



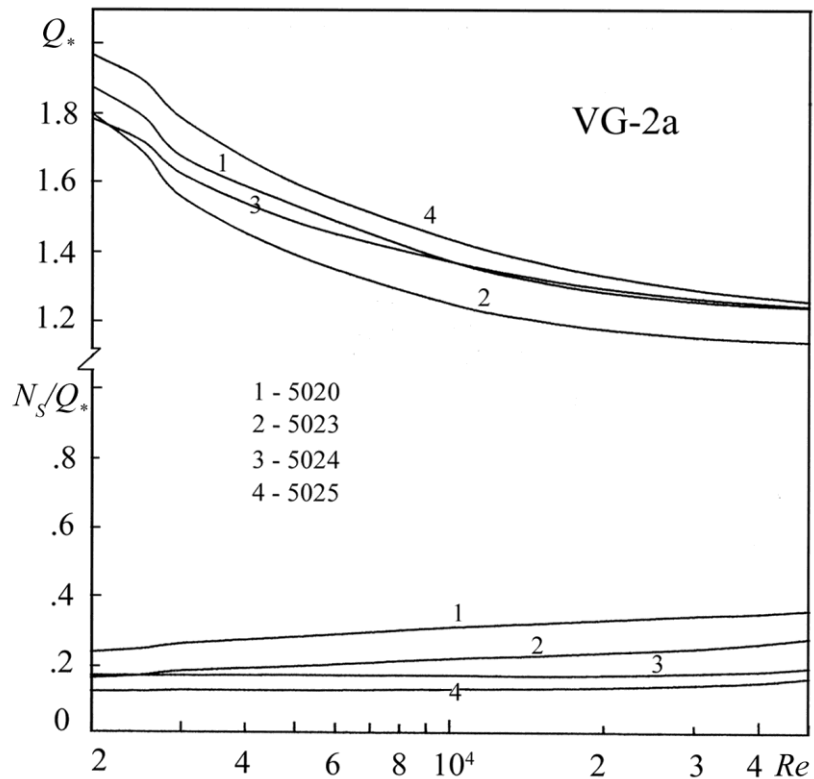
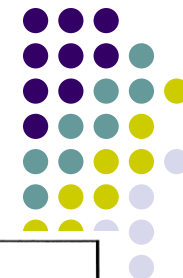
Изменение на $N_S A_*$ от ϕ



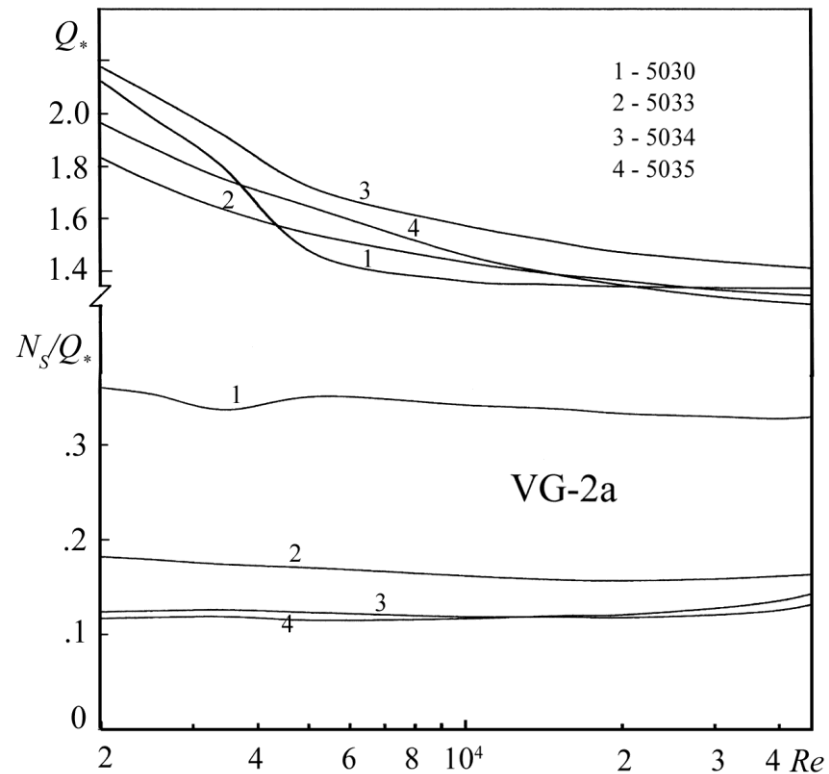
- **Случай VG-2a**
- **Цел: $Q_* > 1$, $N_s < 1$**

$$N_s = \frac{1}{1 + \phi_o} \left\{ Q_* (f_R / f_S)^{-0.364} D_*^{2.091} \times \exp \left(B \left(1 - \frac{St_R}{St_S} (f_R / f_S)^{-0.291} D_*^{-0.127} \right) \right) \times \right.$$

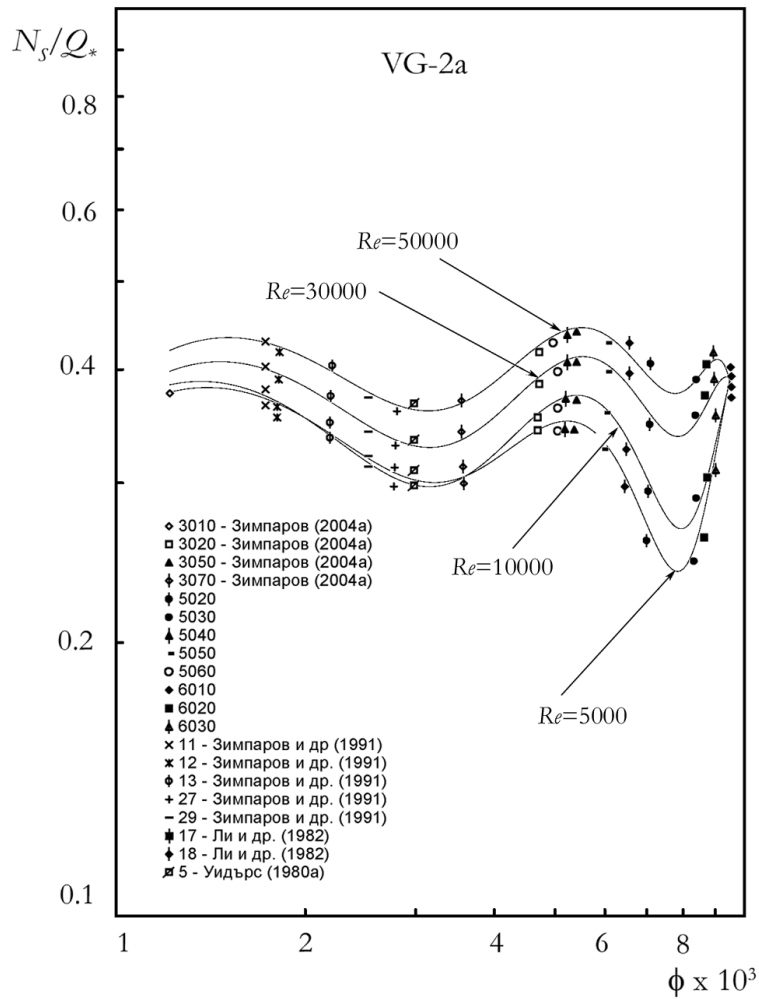
$$\left. \left(\frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} + Q_* \left(1 - \frac{T_{i,S}}{T_{o,S}} \right) \right)^{-1} + \phi_o / N_* \right\} = f(Re_R)$$



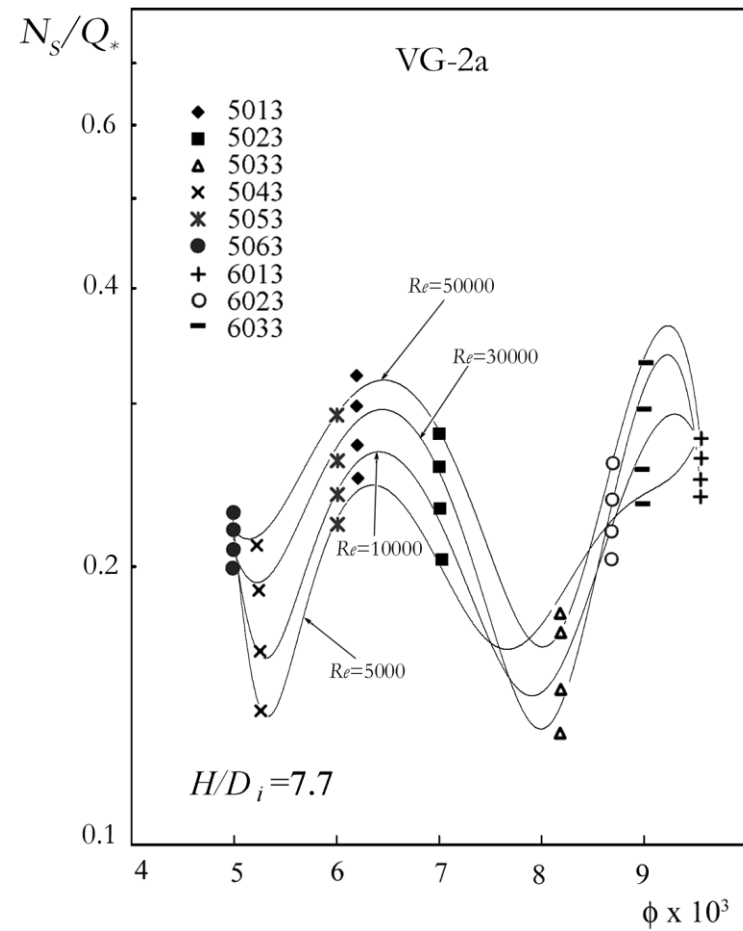
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re



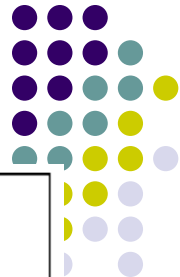
Изменение на Q_* и N_s/Q_* от Re

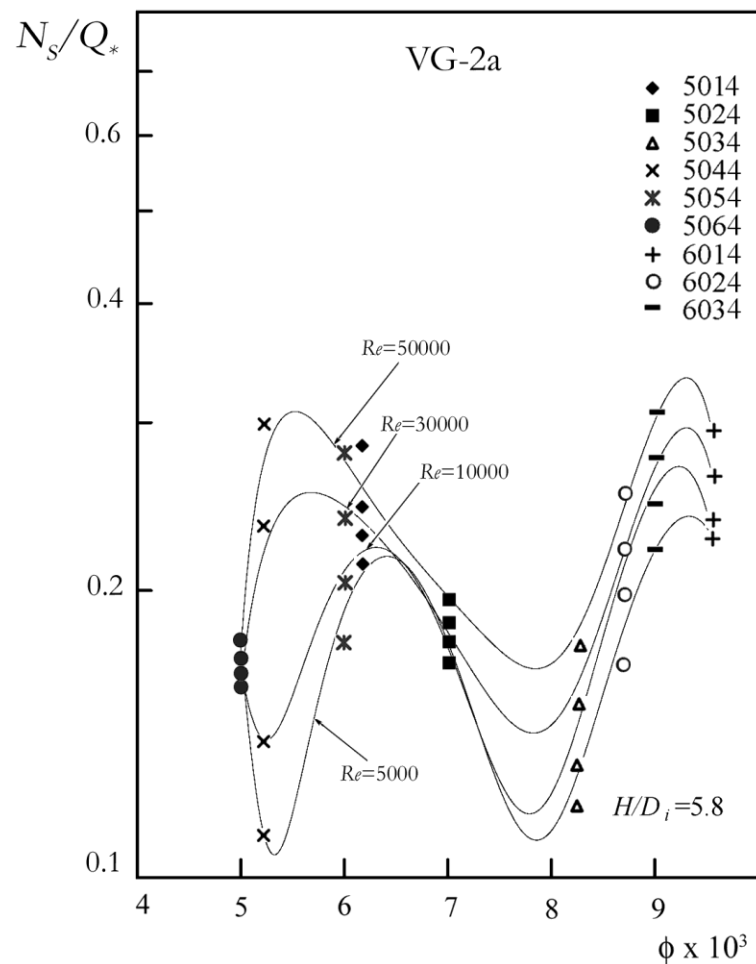
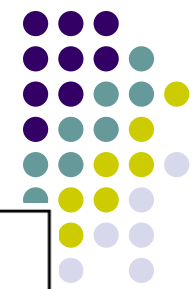


Изменение на N_s/Q_* от ϕ

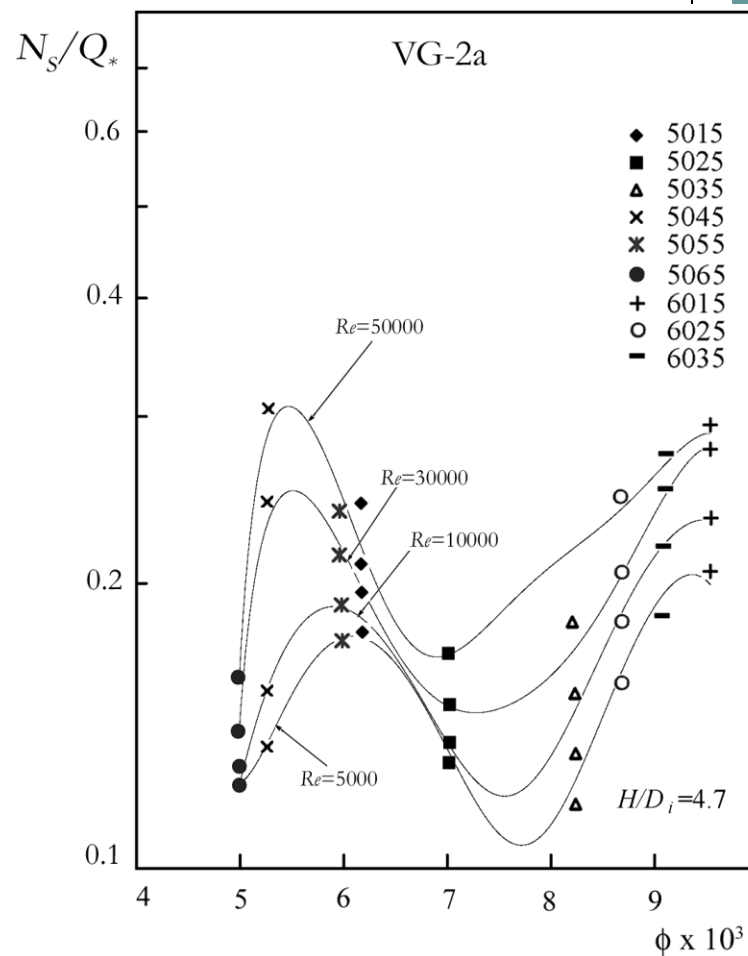


Изменение на N_s/Q_* от ϕ





Изменение на N_s/Q_* от ϕ



Изменение на N_s/Q_* от ϕ

Научни и научно-приложни приноси



- Научни приноси

1. Потвърдена е хипотезата на Уидърс (в частта) за наличие на повече от един максимуми на функцията $E_{h,i}=(Re, \phi)$. Същевременно, наложеното разбиране, че не трябва да се използват СВТ с по-дълбоки турбулизатори, $e/D>0.045$, за интензификация на топлообмена, поради по-големите енергийни разходи за преодоляване на хидравличните съпротивления, не е оправдано.
- Публикувано в
 - Zimparov V.D, **Penchev P.J**, Entropy generation minimization of deep spirally corrugated tubes for shell and tube heat exchangers, *Proc. Int. Conf. ECOS 2002*, Berlin, Germany, Vol.III, pp.1581-1588, 2002.
 - Zimparov V.D, **Penchev P.J**, Performance evaluation of deep spirally corrugated tubes for shell- and-tube heat exchangers, *Proc, 3 rd Int. Conf. on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation*, Guangzhou, China, 12-15 January, 904-911, 2004.
 - Zimparov V.D, **Penchev P.J**, Performance evaluation of deep spirally corrugated tubes for shell- and-tube heat exchangers, *J. Enh. Heat Transfer*, 11 (4), 200-211, 2004
 - **Пенчев П**, Зимпаров В., Термодинамична ефективност на напречно-валцовани тръби, *Механика на машините*, год. XI, кн. 3, 59-63, 2003

● Научно-приложни приноси

1. Потвърдено е, че използването на “характерният индекс” ϕ , при корелиране на експерименталните данни за коефициентите на хидравлично съпротивление и топлопредаване, е полезно за определяне на оптималните геометрични параметри на едноходови СВТ. Показано е, че от значение е единствено стойността на “характерния индекс” ϕ , а не стойностите на геометричните симплекси, e/D , и p/e , разглеждани самостоятелно.
2. Установено е, че за СВТ с $e/D > 0.056$, и комбинирани със спирални ленти, стойностите на коефициентите на хидравлично съпротивление почти не зависят от стъпката на лентата. Наблюдава се и изчерпване на нарастването на коефициента на топлопредаване (тръба 5030, $e/D = 0.057$ и $p/e = 6.77$) и влошаване на топлообмена.

Публикувано в

Zimparov VD, **Penchev PJ**, Bergles AE, Performance characteristics of of some rough surfaces with tubes inserts for single-phase flow, *J. Enh. Heat Transfer*, 2005,

Zimparov, V.D., and **Penchev, P.J.**, Compound Heat Transfer Enhancement– Performance Characteristics of Some Rough Surfaces with Twisted Tape Inserts, *Proc. 2nd Int. Ther. Sci. Seminar*, Bled, Slovenia, June 12-16, 2004.

Пенчев П, Интензификация на топлообмена чрез използване на дълбоко спирално-валцовани тръби със спирални ленти, *Механика машините*, (52), Книга 3, 68-72, 2004.

Пенчев П, Интензификация на топлообмена чрез използване на тръби с дълбоко спирално-валцовани турбулизатори и спирални ленти, Част 2: Критерии за термодинамична оценка, *Известия на Съюза на учените – Сливен*, Том 8, 38-41, 2004.



3. Съществува проста корелационна зависимост за нарастването на коефициента на хидравлично съпротивление $E_f = f(Re, \phi)$. Влиянието на стъпката на спиралната лента е незначително.
4. Изведени са прости корелационни зависимости за $E_{h,i}$ в зависимост от геометричните безизмерни параметри, Re и Pr , за областите $p/e > 9.0$ и $p/e < 9.0$. Тези корелации могат да се използват при проектирането на ТА.
5. Представен е опростен модел, отразяващ физичната връзка между стойностите на критерия на Вебер, отразяващ влиянието на силите на повърхностно триене и геометрията на канавката, стойностите на Re и стъпката на спиралната лента H/D_i . Моделът е приложим за едноходови спирално-валцовани тръби и може да бъде използван в инженерната практика.

Публикувано в:

Zimparov VD, **Penchev PJ**, Bergles AE, Performance characteristics of deep corrugated tubes with twisted tape inserts, Proc. 4-nd, *Int. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, June 21-24, 2004, Cape Town, South Africa, Paper No: ZV1

Пенчев П, Интензификация на топлообмена чрез използване на тръби с дълбоко спирално-валцовани турбулизатори и спирални ленти, Част 1: Термодинамични характеристики, *Известия на Съюза на учените – Сливен*, Том 8, 34-37, 2004.

6. Потвърдено е, че използването на комплекса ϕ , като параметър на функциите N_s/Q_* и $N_s A_*$ е полезно за определяне на оптималните геометрични параметри на едноходови СВТ, при използването им за ефективна интензификация на топлообмена.