

Тема 2 (2 час, лекция 1)

Лекция 9

Конвективный теплообмен при вынужденном течении однофазной среды в трубах. Особенности течения и теплообмена. Начальные участки гидродинамической и тепловой стабилизации. Стабилизированное течение. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном течении жидкости в трубах. Методы расчета теплообмена с использованием современной вычислительной техники.

Вильгельм Нуссельт (**Wilhelm Nusselt**), (1882 – 1957) нем. инженер.

До 1904 г. изучал механизмы в техн. университетах Берлина, Шарлоттенбурга и Мюнхена.

Вел передовые исследования в области математики и физики в лаборатории технической физики в Мюнхене.

Докторская диссертация "Теплопроводность изоляционных материалов" в 1907 году.

1907 - 1909 г.г. ассистент Миллера в Дрездене, получил звание профессора.



В 1915 г. - новаторская работа по основным законам переноса тепла, в которой впервые предложены безразмерные группы, теперь известные как основные параметры в теории подобия теплообмена.

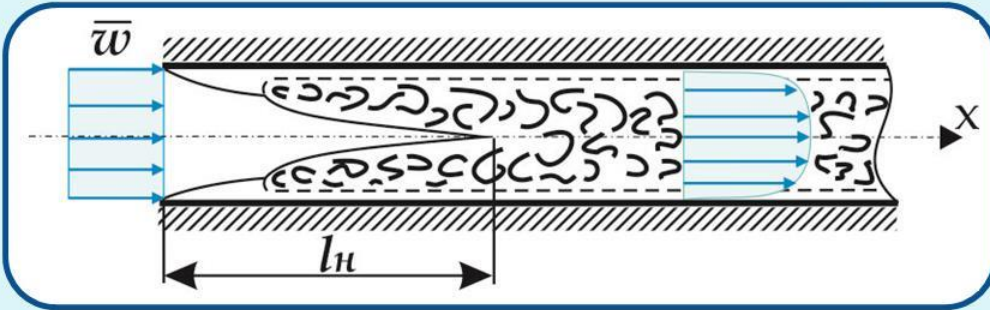
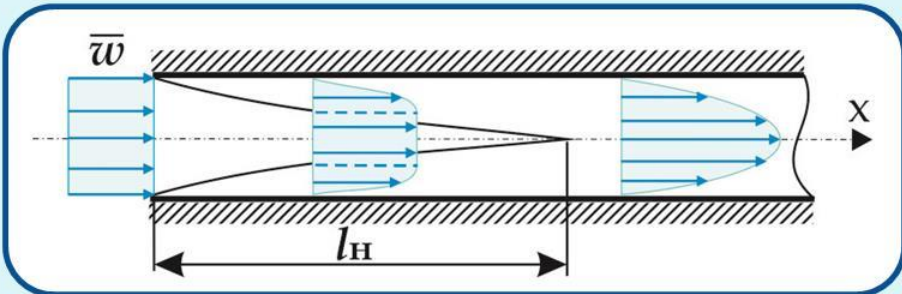
Известные работы были связаны с пленочной конденсацией пара на вертикальных поверхностях, сжигание пылевидного угля и аналогия между тепло- и массообменом в испарении.

Основным математическими работами - хорошо известные решения для ламинарного теплообмена в трубных пучках, теплообмен в поперечном потоке и основы теории регенераторов.

Профессор Технических университетов Карлсруэ 1920-1925 и в Мюнхене с 1925 вплоть до своей отставки в 1952 году.

Награжден медалью Гаусса-Грасгофа и памятной медалью.

Гидродинамика и теплообмен при течении жидкости в трубах и каналах. Участки гидродинамической и тепловой стабилизации



Процесс более сложным чем при омывании поверхности, при котором вдали от тела жидкость не испытывает влияние стенки.

Поперечное сечение трубы имеет конечные размеры и, как следствие, происходит изменение температуры как по сечению, так и по длине канала.

$$G = const = \rho \bar{w} f; \quad \rho = const;$$

$$\bar{w} = G / (\rho \cdot f)$$

$$\text{Чаще всего } t_{ж} = 0,5 \cdot (T_{ж,вх} + T_{ж,вых})$$

$$Re_{жд} = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu_{ж}}$$

Ламинарный режим $Re_{жд} < 2000 \div 2300$

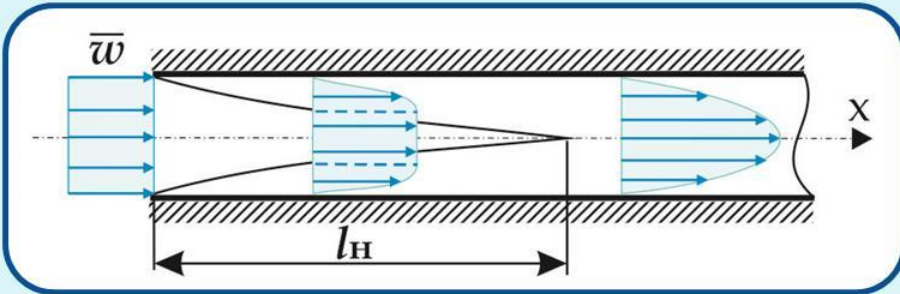
При $Re_{жд} > 2300$ поток после единичного возмущения уже не возвращается к ламинарному течению.

Развитое турбулентное течение в тех. трубах устанавливается при $Re_{жд} > 10^4$, но при $Re_{жд} < 5 \cdot 10^4$ при плавном входе до критической толщины пограничного слоя может существовать ламинарное течение.

Между этими режимами - переходный режим течения с переходным режимом теплоотдачи.

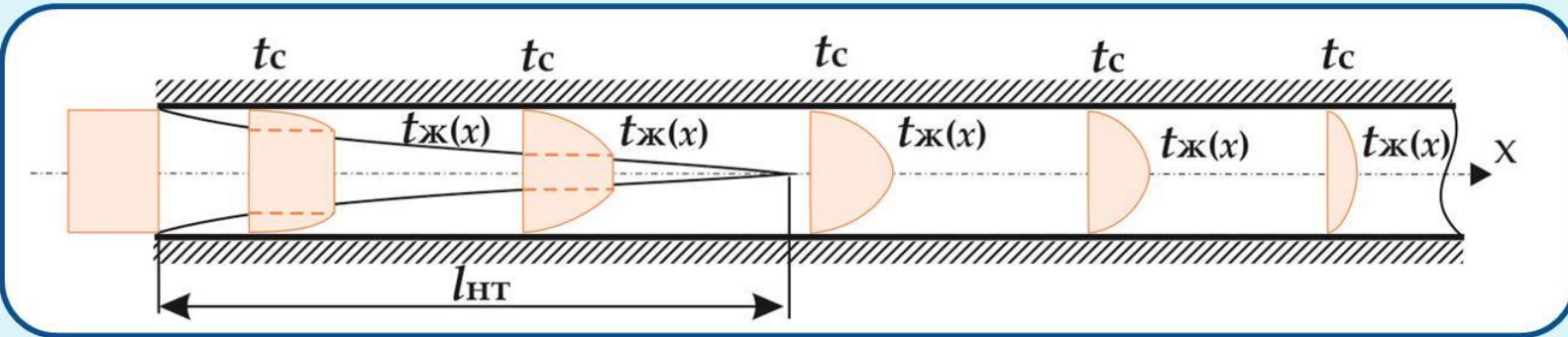
Ламинарный режим

$$l_H = 0.065 \operatorname{Re}_{\text{ж}d} \cdot d$$



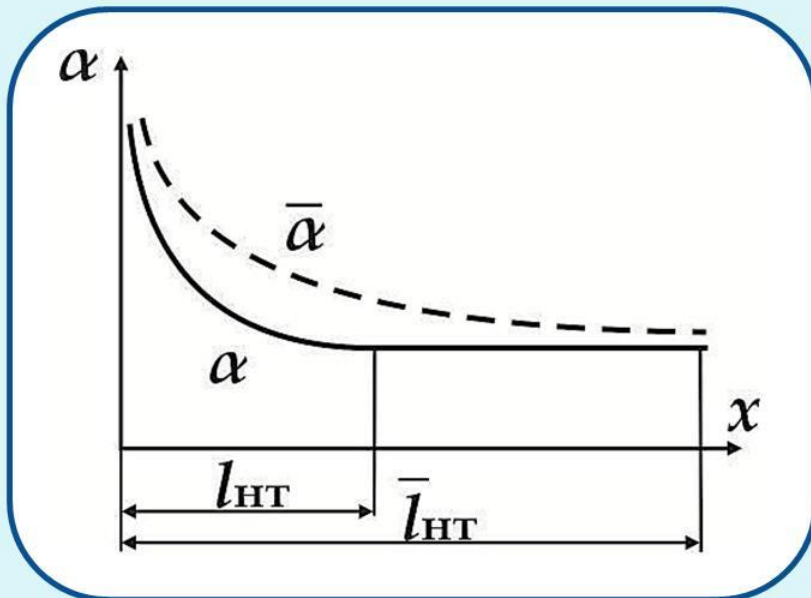
После чего

$$w = w_{\max} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \Rightarrow \bar{w} = 0.5 \cdot w_{\max}$$



$$t_c = \text{const} \quad l_{HT} = 0.055 \operatorname{Pe}_{\text{ж}d} \cdot d$$

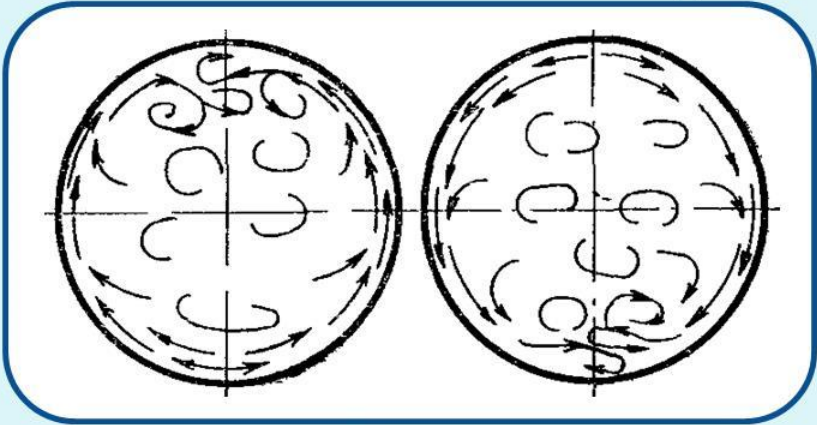
$$q_c = \text{const} \quad l_{HT} = 0.070 \operatorname{Pe}_{\text{ж}d} \cdot d$$



$$\overline{|\theta_0|} = \frac{|\theta_0|_{\text{ВХ}} - |\theta_0|_{\text{ВЫХ}}}{\ln \frac{|\theta_0|_{\text{ВХ}}}{|\theta_0|_{\text{ВЫХ}}}}$$

$$\overline{l_{HT}} = 10 \cdot l_{HT}$$

Влияние силы тяжести. Вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы теплоотдачи.



Вязкостно-гравитационный режим

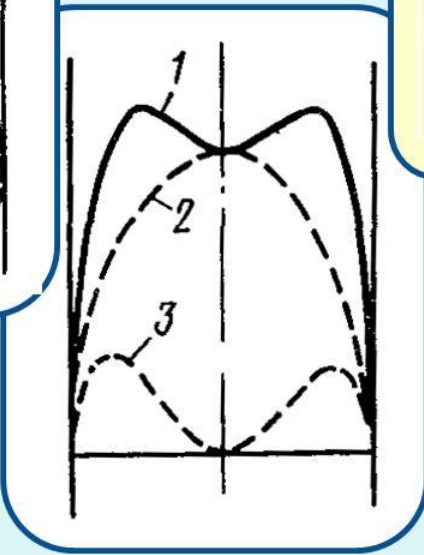
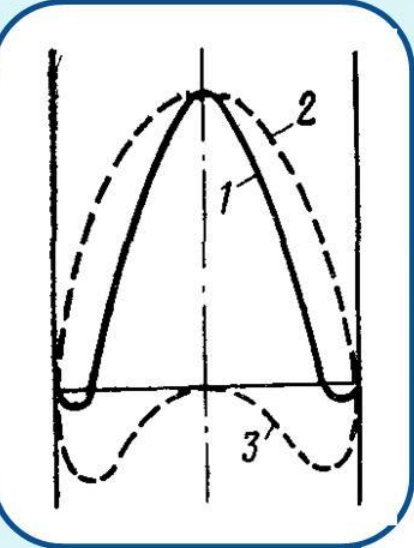
$$Ra_{жс d} > 8 \cdot 10^5$$

М. А. Михеев

$$t_{жс d} = 0,5 \cdot (t_c + t_{ж})$$

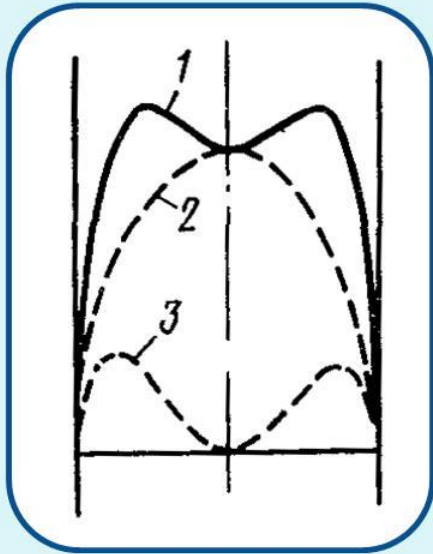
$$\overline{Nu}_{ж d} = 0.15 \cdot Re_{ж d}^{0.33} \cdot Pr_{ж d}^{0.43} \cdot Gr_{ж d}^{0.1} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_\ell$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad \ell/d \geq 50 \Rightarrow \varepsilon_\ell = 1$$



l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_ℓ	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02	1

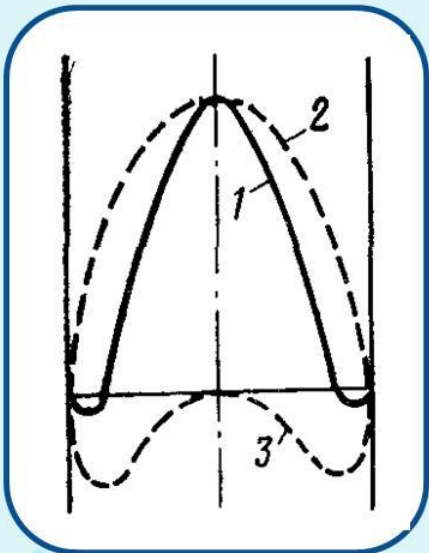
В том же направлении



$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жс}d} = 0.35 \cdot \left(\text{Re}_{\text{жс}d} \cdot \frac{d}{l} \right)^{0.3} \left(\text{Ra}_{\text{жс}d} \cdot \frac{d}{l} \right)^{0.18}$$

$$\text{Re}_{\text{жс}d} \cdot \frac{d}{l} \approx 1.5 \left(\text{Ra}_{\text{жс}d} \cdot \frac{d}{l} \right)^{0.25} ; \quad 8 \cdot 10^5 \leq \text{Ra}_{\text{жс}d} \leq 4 \cdot 10^8 /$$

В противоположном направлении



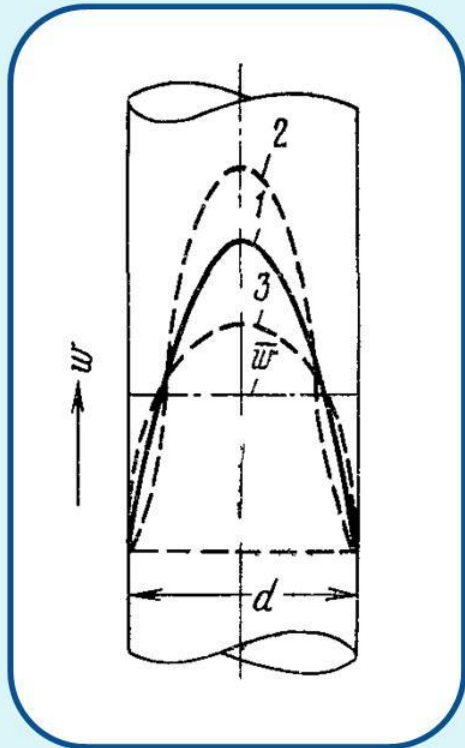
$$\overline{\text{Nu}}_{\text{ж}d} = 0.37 \cdot \text{Re}_{\text{ж}d}^{0.37} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0.4} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{с}}} \right)^n$$

нагрев - $n = 0.11$

остывание - $n = 0.25$

$$250 \leq \text{Re}_{\text{ж}d} \leq 2 \cdot 10^4 \quad 1.5 \cdot 10^6 \leq \text{Ra}_{\text{ж}d} \leq 12 \cdot 10^6$$

Ламинарный вязкостной режим движения



Б.Г. Петухов

$$0.07 \leq \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \leq 1500 :$$

$$\overline{Nu}_{жд} = 1.55 \cdot \left(Re_{жд} \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^{0.14} \varepsilon_l$$

$$\frac{l}{Re_{жд} d} > 0.1 \quad \varepsilon_l \approx 1.0$$

$$\frac{l}{Pe \cdot d} \leq 0.1 \quad \varepsilon_l = 0.6 \cdot \left[1 + 2.5 \cdot \frac{l}{Re_{жд} d} \right] / \left(\frac{l}{Re_{жд} d} \right)^{\frac{1}{7}}$$

Стабилизированный теплообмен. Интеграл Лайона.

$$\left. \begin{array}{l} q_c = const \\ \frac{d\bar{t}_ж}{dx} = const \end{array} \right\} t_c(x) - \bar{t}_ж(x) = \theta_0(x) = const$$

В рассматриваемых условиях средняя температура жидкости будет линейной функцией по x , так как при постоянном значении коэффициента теплоотдачи α (стабилизированное течение) по линейному закону изменяется не только $\bar{t}_ж(x)$, но и температура стенки.

$$\frac{1}{Nu_{жд}} = 2 \int_0^1 \frac{\left(\int_0^R W_x R dR \right)^2}{\left(1 + \frac{\lambda_T}{\lambda} \right) R} dR$$

$$W_x = \frac{w_x}{w_x}; \quad R = \frac{r}{r_0}$$

Для ламинарного течения все упрощается

$$\begin{array}{ll} q_c = const & \Rightarrow \quad Nu_{жд} = \frac{48}{11} \approx 4.36 \\ t_c = const & \Rightarrow \quad Nu_{жд} \approx 3.66 \end{array}$$

Имеет место при исчезающе малых температурных напорах или при неизменных параметрах жидкости.

Расхождение полученного результата с опытными данными может быть очень велико.

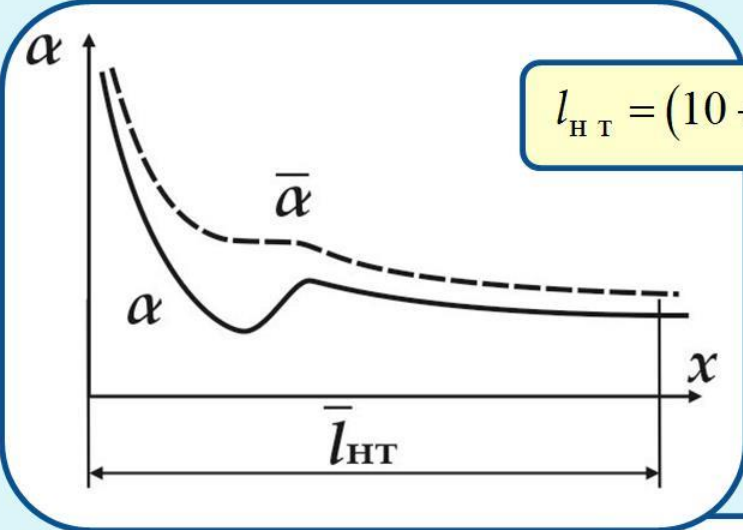
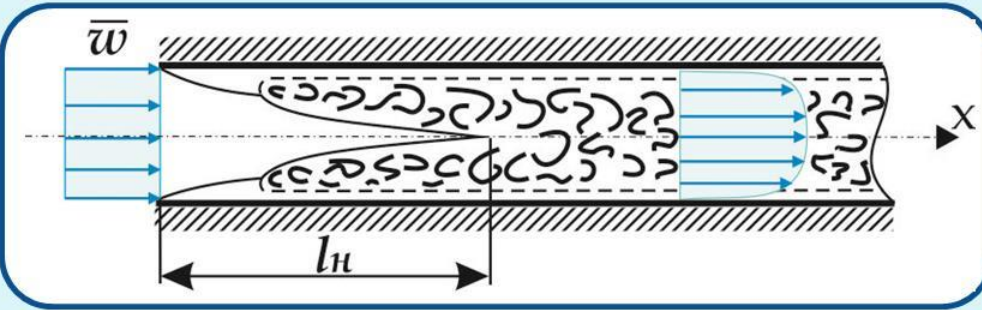
В настоящее время практические расчеты ведутся по эмпирическим формулам.

Турбулентный режим

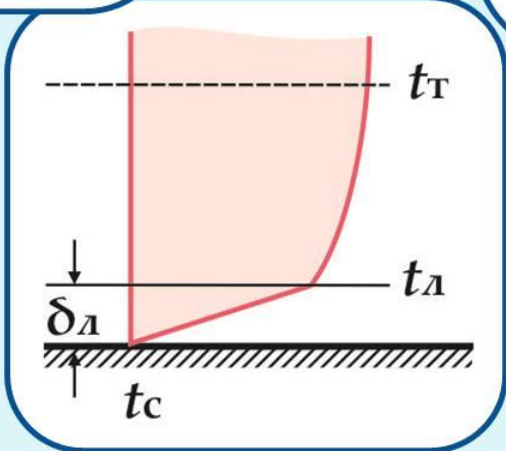
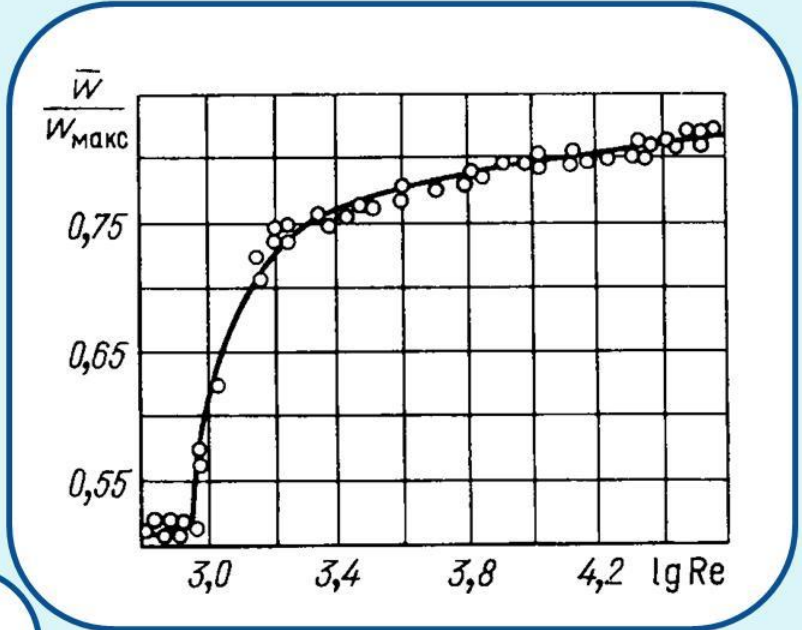
$$l_H = 1.45 \operatorname{Re}_{\text{жд}}^{0.25} \cdot d$$

Усеченная парабола

$$w = w_{\max} \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \Leftrightarrow n = \frac{1}{7} \div \frac{1}{9}$$



$$l_{HT} = (10 \div 15) \cdot d$$



Анализ линейных профилей температур и скоростей в вязком подслое приводит

к зависимости

$$\left. \begin{aligned} s_c &= \mu \frac{w_{\text{ВП}}}{\delta_{\text{ВП}}} \\ q_c &= \lambda \frac{t_{\text{ВП}} - t_c}{k_{\text{ВП}}} = \lambda \frac{\theta_{\text{ВП}}}{k_{\text{ВП}}} \end{aligned} \right\} q_c = s_c \frac{\lambda}{\mu} \frac{\theta_{\text{ВП}}}{w_{\text{ВП}}} \frac{\delta_{\text{ВП}}}{k_{\text{ВП}}}$$

Пренебрегая молекулярным переносом в турбулентном ядре приходят к зависимости

$$q_T = s_T c_p \frac{t_0 - t_{\text{ВП}}}{w_0 - w_{\text{ВП}}} \approx q_c \quad t_0 - t_{\text{ВП}} = \frac{q_c w_0}{s_c c_p} \left[1 + \frac{\mu c_p}{\lambda} \frac{k_{\text{ВП}}}{\delta_{\text{ВП}}} \frac{w_{\text{ВП}}}{w_0} - \frac{w_{\text{ВП}}}{w_0} \right]$$

Пользуясь

$$\frac{k_{\text{ВП}}}{\delta_{\text{ВП}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{\text{Pr}}} \quad \xi = \frac{2s_c}{\rho w_0^2} \quad \text{St} \equiv \frac{\text{Nu}}{\text{Re Pr}} \equiv \frac{\text{Nu}}{\text{Pe}} = \frac{\alpha}{\rho c_p w_0} = \frac{\xi/2}{1 + 12\sqrt{\xi/2} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right)}$$

$\text{Pr} = 1 \Rightarrow \text{St} = \xi/2$ – аналогия О. Рейнольдса (1874 г.)

Формула Б.С. Петухова – В.В. Кириллова

$$\text{Nu} = \frac{\xi}{8} \text{Re Pr} \frac{1}{1 + \frac{900}{\text{Re}} + 12.7 \sqrt{\frac{\xi}{2}} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right)} \varepsilon_t \quad 0.5 < \text{Pr} < 200 \quad 4 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^7$$

Из формулы Петухова – Кириллова с помощью уточняющих предположений

М. А. Михеев:
$$\overline{Nu}_{jd} = 0.021 \cdot Re_{jd}^{0.8} Pr_{ж}^{0.43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0.25} \varepsilon_l$$

$Re_{dж}$	l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

А.С. Сукомел

$$Nu_{ж(x)} = 0.022 \cdot Re_{ж(x)}^{0.8} Pr_{ж(x)}^{0.43} \varepsilon_l$$

$ж(x)$ – средняя по сечению

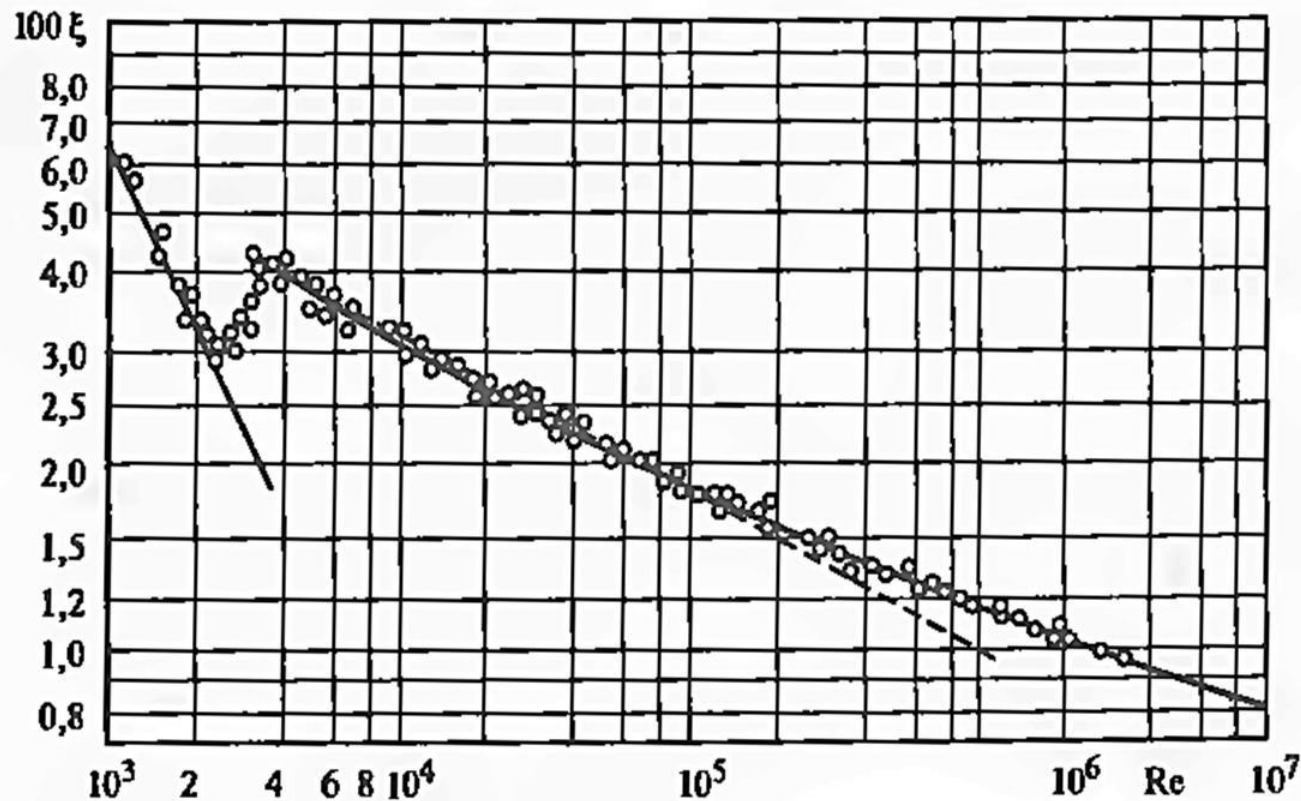
$$\varepsilon_l = 1.38 \left(\frac{x}{d} \right)^{-0.12} \quad \frac{x}{d} < 15$$

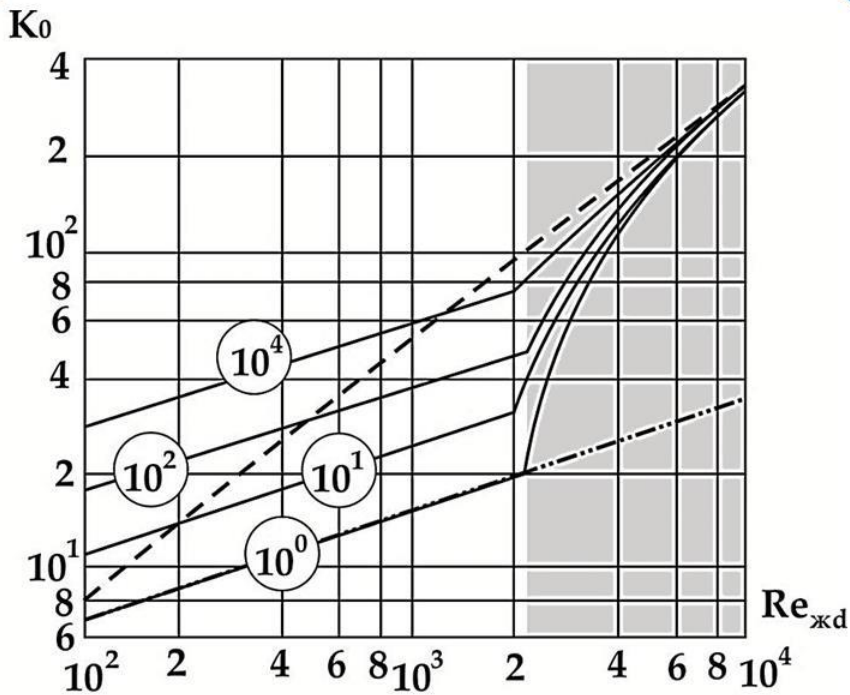
$$\varepsilon_l \approx 1 \quad \frac{x}{d} \geq 15$$

Теплоотдача при переходном режиме течения ($2300 \leq Re \leq 10^4$)

Неустойчивый режим с образованием «турбулентных пробок», «плывающей турбулентности» и т.п.

$$\Delta p = \xi \frac{l}{d} \frac{\rho \bar{w}^2}{2}$$





$$\overline{Nu}_{зд} = K_0(Re) \cdot Pr_{зд}^{0.43} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_l$$

ε_l – как и при турбулентном режиме

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0(Re)$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Переходный режим течения в прямых гладких трубах также можно рассчитать:

$$\overline{Nu} = \gamma \cdot \overline{Nu}_{турб} + (1 - \gamma) \cdot \overline{Nu}_{лам}$$

γ – коэффициент перемежаемости

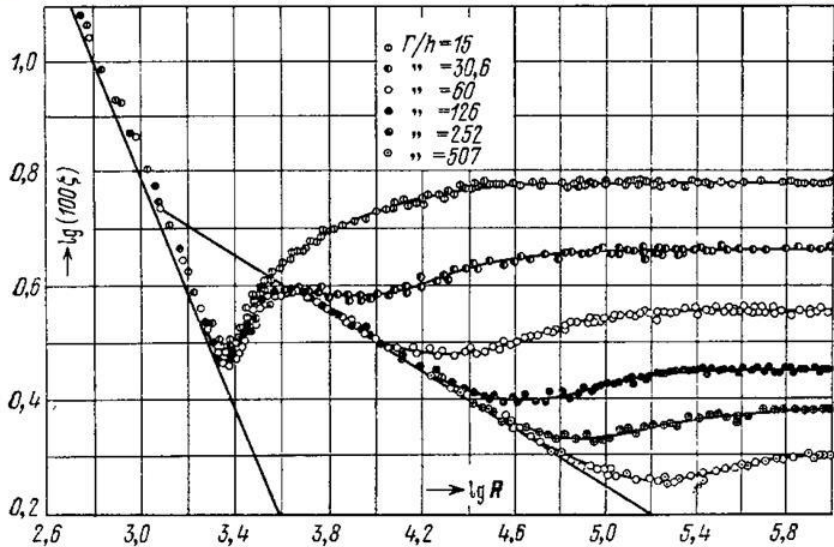
$$\gamma = 1 - \exp(1 - Re / 2300)$$

Некруглого сечения

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4S}{\Pi}$$

Шероховатые

$$\frac{\text{расстояние}}{\text{высота}} = \frac{s}{\delta} \Rightarrow \left(\frac{s}{\delta}\right)_{\text{ОПТ}} = 12 \div 14$$

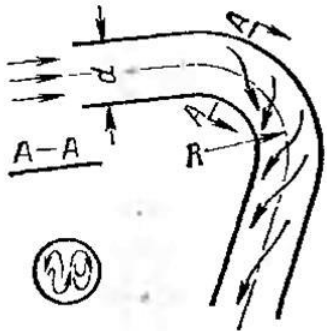


$$\frac{s}{\delta} > \left(\frac{s}{\delta}\right)_{\text{ОПТ}}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{Ш}} = \exp \left[0.85 \frac{\left(\frac{s}{\delta}\right)_{\text{ОПТ}}}{\frac{s}{\delta}} \right]$$

$$\frac{s}{\delta} < \left(\frac{s}{\delta}\right)_{\text{ОПТ}}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{Ш}} = \exp \left[0.85 \frac{\frac{s}{\delta}}{\left(\frac{s}{\delta}\right)_{\text{ОПТ}}} \right]$$



Плавный поворот (змеевик)
без вторичных течений

$$\varepsilon_{\text{поворот}} = 1 + 1.18 \frac{d}{R}$$

Физические свойства сухого воздуха при $B = 760$ мм рт.ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,155	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Физические свойства воды на линии насыщения

t °C	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^8$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	$\beta\cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma\cdot 10^4$ Н/м	Pr
10	0,0123	999,7	41,99	4,193	0,586	14,0	1299,2	1,300	0,70	744	9,3
20	0,0234	998,3	83,86	4,182	0,602	14,4	1001,5	1,003	1,82	729	6,96
30	0,0424	995,8	125,66	4,179	0,617	14,8	797,0	0,800	3,21	712	5,40
40	0,0737	992,3	167,45	4,179	0,630	15,2	651,3	0,656	3,87	695	4,32
50	0,123	988,0	209,26	4,181	0,643	15,6	544,0	0,551	4,49	678	3,54
60	0,199	983,2	251,09	4,185	0,653	15,9	463,0	0,471	5,11	661	2,97
70	0,312	977,7	292,97	4,190	0,662	16,2	400,5	0,410	5,70	644	2,54
80	0,474	971,6	334,92	4,197	0,669	16,4	351,0	0,361	6,32	627	2,20
90	0,701	965,2	376,94	4,205	0,675	16,6	311,3	0,322	6,95	609	1,94
100	1,013	958,1	419,06	4,216	0,680	16,8	279,0	0,291	7,52	590	1,73
110	1,433	950,7	461,3	4,229	0,683	17,0	252,2	0,265	8,08	570	1,56
120	1,985	942,7	503,7	4,245	0,685	17,1	230,0	0,244	8,64	550	1,43
130	2,701	934,6	546,3	4,263	0,687	17,2	211,0	0,226	9,19	529	1,31
140	3,614	925,8	589,1	4,285	0,687	17,3	195,0	0,211	9,72	508	1,22
150	4,760	916,8	632,2	4,310	0,686	17,4	181,0	0,197	10,3	487	1,14
160	6,180	907,3	675,5	4,339	0,684	17,4	169,0	0,186	10,7	466	1,07
170	7,920	897,3	719,1	4,371	0,681	17,4	158,5	0,177	11,3	444	1,02
180	10,03	886,9	763,1	4,408	0,676	17,3	149,3	0,168	11,9	422	0,97
190	12,55	876,0	807,5	4,449	0,671	17,2	141,2	0,161	12,6	400	0,94
200	15,55	864,7	852,4	4,497	0,664	17,1	133,8	0,155	13,3	378	0,91