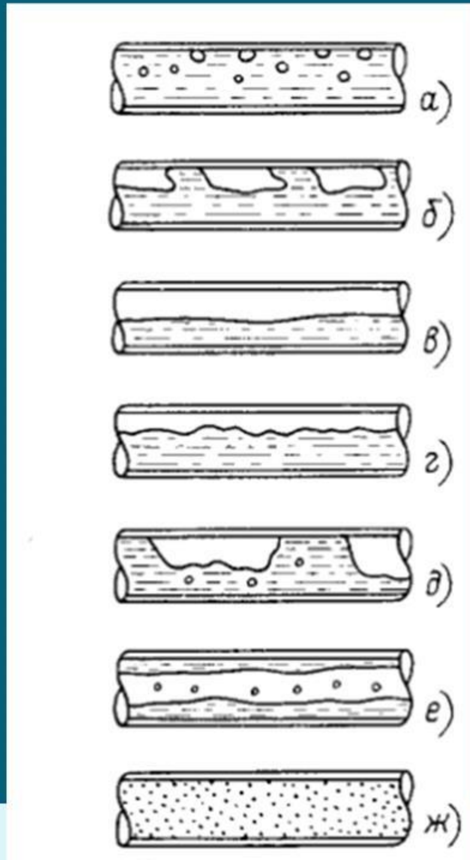
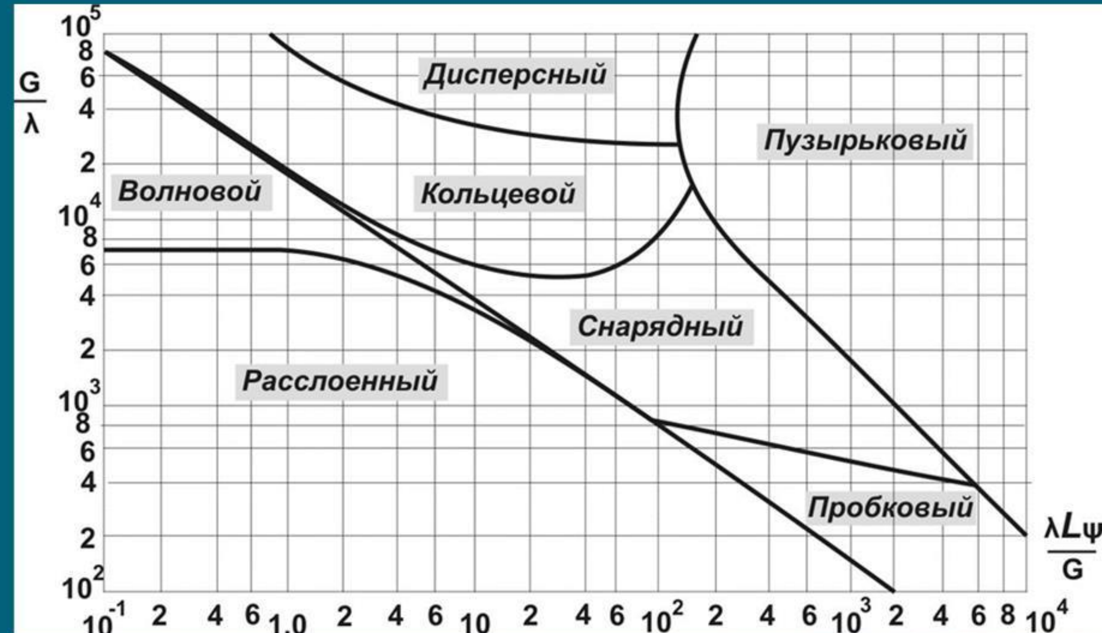
Лекция 8
Гидродинамика двухфазных течений. Стационарное и нестационарное течение.

В гомогенных – все (режим течения) в:

$$\mathrm{Re} = \frac{w\ell}{\nu}$$



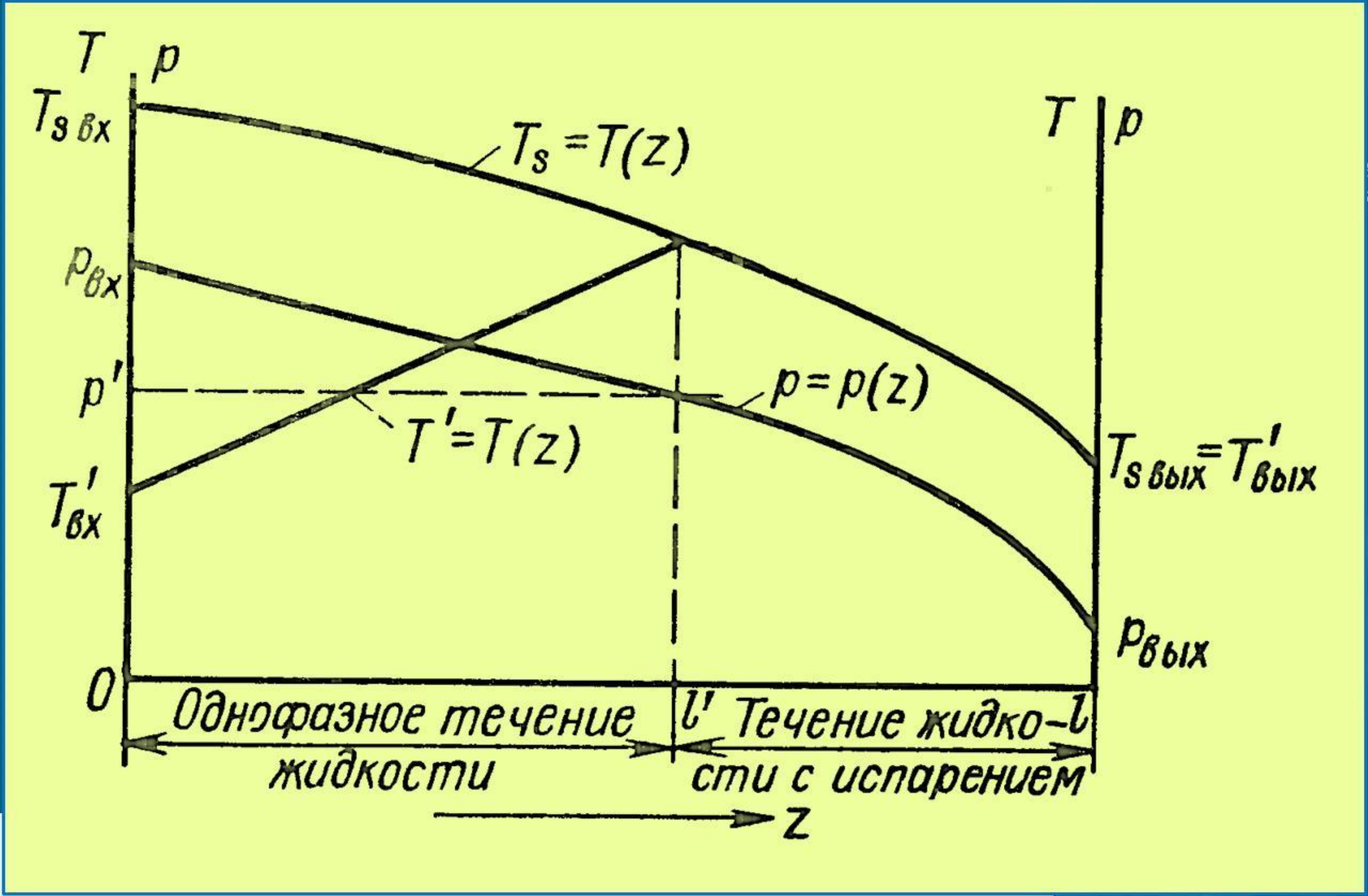


$$\lambda=\left[\frac{\rho_{п}}{\rho_{a}}\frac{\rho_{ж}}{\rho_{w}}\right]^{\frac{1}{2}};\ \psi=\left(\frac{\sigma_{ж}}{\sigma_{W}}\right)\left[\left(\frac{\mu_{W}}{\mu_{ж}}\right)\left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{W}}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{3}};$$

$$G=x;\ L=1-x.$$

Целиком испаряется

$$\frac{l}{d}=\frac{\rho w\left[r+c_{p}\left(t_{s}-t_{входа}\right)\right]}{4\bar{q}}$$



При одномерном течение – уравнение Бернулли

$$p = p_{\text{входа}} - \left(\frac{\lambda_{\text{трения}} z}{d} + \sum \zeta \right) \frac{\rho w^2}{2}$$

При $\mathrm{Re} > 10^5$ $\lambda_{\text{трения}} = 0.0015 \div 0.021$

$$\delta q = Tds = dh - vdp + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \mathrm{g}dz$$

$$dh = Tds + vdp = c_p dT + \left[-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v\right]dp$$

$$\left[-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v\right] = -c_p \alpha_h$$

$$c_p dT = dq + c_p \alpha_h dp \quad \boxed{-d\left(\frac{w^2}{2}\right) - \mathrm{g}dz}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{Q}{Gc_p} + \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp$$

Q – через изоляцию и от наддува

Дифференциальный джоуль-томпсоновский эффект криогенных жидкостей вблизи температуры насыщения при атмосферном давлении и его отдельные составляющие

Жидкий продукт	Темпе-ратура, К	$(\partial T/\partial p)_i$, К/МПа	$(\partial T/\partial p)_s$, К/МПа	v/c_p, К/МПа	Жидкий продукт	Темпе-ратура, К	$(\partial T/\partial p)_i$, К/МПа	$(\partial T/\partial p)_s$, К/МПа	v/c_p, К/МПа
CH_4	112	—0,36	0,24	—0,6	N_2	77	—0,36	0,23	—0,59
O_2	90	—0,32	0,18	—0,5	H_2	21	—1,12	0,38	—1,5
Ar	88	—0,374	0,266	—0,64	He	4,2	—0,6	1,3	—1,9

$$\xi_{\Sigma} \ll \lambda_{тр}\, l/D,$$

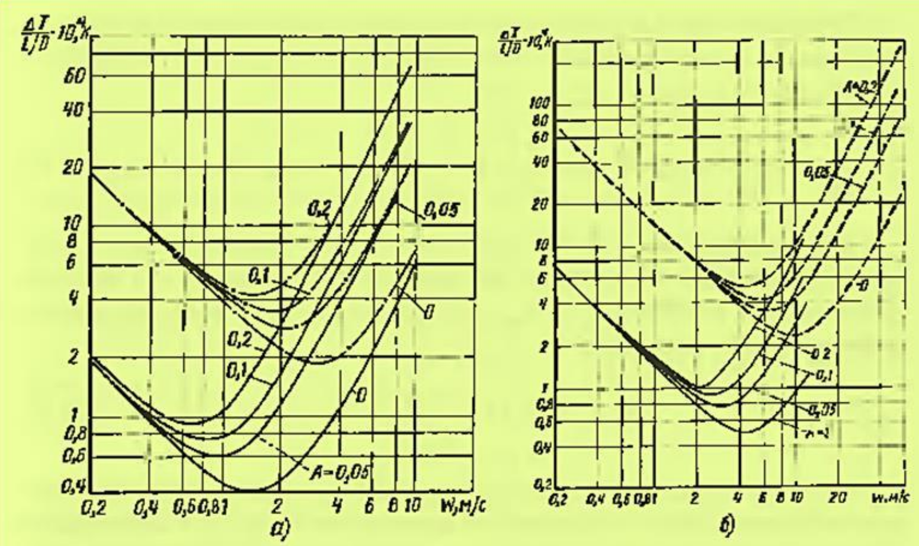
$$w_{0,\,\lambda} = 1{,}17 \left(\frac{q\,\eta}{\lambda_{тр}\,\rho}\right)^{1/3}.$$

$$w_{\xi,\,0} = 1{,}17 \left[\frac{q\,\eta}{\lambda_{тр}\,\rho\,[(1 + 0{,}8\xi_{\Sigma}/(\lambda_{тр}\, l/D)]}\right]^{1/3}.$$

$$w = \frac{4G}{\pi D^2 \rho} =$$

$$p_{вх} = p_{вых} + \left(\xi_{\Sigma} + \frac{\lambda_{тр}\, l}{D}\right)\frac{\rho w^2}{2} =$$

$$T_{вх} = T_{вых} - \frac{q\pi D l}{G c_p} - \frac{p_{вх} - p_{вых}}{\rho c_p}$$



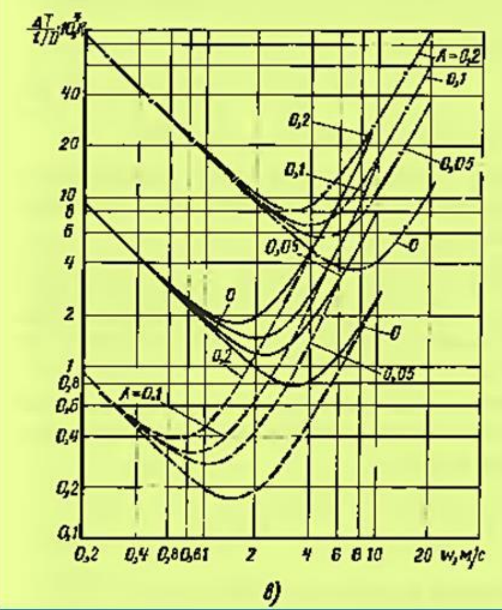


Рис. 5. 44. Кривые прогрева жидкого криопродукта на одном калибре трубы в зависимости от скорости потока при различных значениях параметра $A = \xi_{\Sigma}/(\lambda l/D)$:

а — кислород, *б* — водород, *в* — гелий

- - - - q = 0,2 Вт/м^2;

——— q = 20 Вт/м^2;

-·-·- q = 200 Вт/м^2

Однофазный поток на выходе

$$T_{\text{вых}} < T_{s\,\text{вых}},$$

$$x_{\text{вых}} < 0$$

Двухфазный поток на выходе

$$T_{s\,\text{вых}} > T_{\text{хр}} + \frac{Q}{Gc_{\text{р}}} + \frac{v\,(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})}{\eta c_{\text{р}}}$$

η — коэффициент объемных и гидравлических потерь в насосе

$$\eta = 0{,}6 \div 0{,}8$$

Анализ теплот

$$x_{\text{вых}} = \frac{Q}{Gr} + \frac{v\,(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})}{\eta r} - \frac{c_{\text{р}}\,(T_{s\,\text{вых}} - T_{\text{хр}})}{r}$$

пузырьковый — жидкая фаза непрерывна, а паровая фаза в виде пузырей прерывиста; режим имеет место при низких паросодержаниях;

снарядный — в потоке проявляются относительно большие объемы пара в результате слияния отдельных паровых пузырей; режим имеет место при умеренных паросодержаниях и относительно низких скоростях потока;

расслоенный — жидкая фаза целиком сосредоточена в нижней части, а паровая фаза — в верхней части горизонтальной трубы; режим имеет место в горизонтальных и слабо наклонных трубах при малых скоростях движения потока;

дисперсно-кольцевой — жидкая фаза образует непрерывное кольцо около стенки, а паровая фаза — ядро, в котором присутствуют капли жидкости; режим наблюдается при больших паросодержаниях и высоких скоростях потока;

обращенный дисперсно-кольцевой — около стенки имеется кольцо паровой фазы, а жидкая фаза с той или иной степенью дисперсности сосредоточена внутри парового кольца; этот режим встречается при устойчивом пленочном кипении;

эмульсионный — жидкая фаза в виде капель распределена в паровой фазе; режим характерен для больших парсодержаний и больших массовых скоростей.

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{см}} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_{\text{тр}} + \left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_{\text{к. д}} + \left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_{\text{п}}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_{\text{к. д}} = \frac{\Delta}{\Delta z}\left[\rho_{\text{г}} W_{\text{г}}^2 \varphi - \rho_{\text{ж}} W_{\text{ж}}^2 (1-\varphi)\right];$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_{\text{п}} = \left[\rho_{\text{г}} \varphi + \rho_{\text{ж}} (1-\varphi)\right] g \cos\alpha,$$

Модель скольжения Мартиннели-Локкарта-Нельсона

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{см}} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{г}} \Phi_{\text{г}}^2;$$

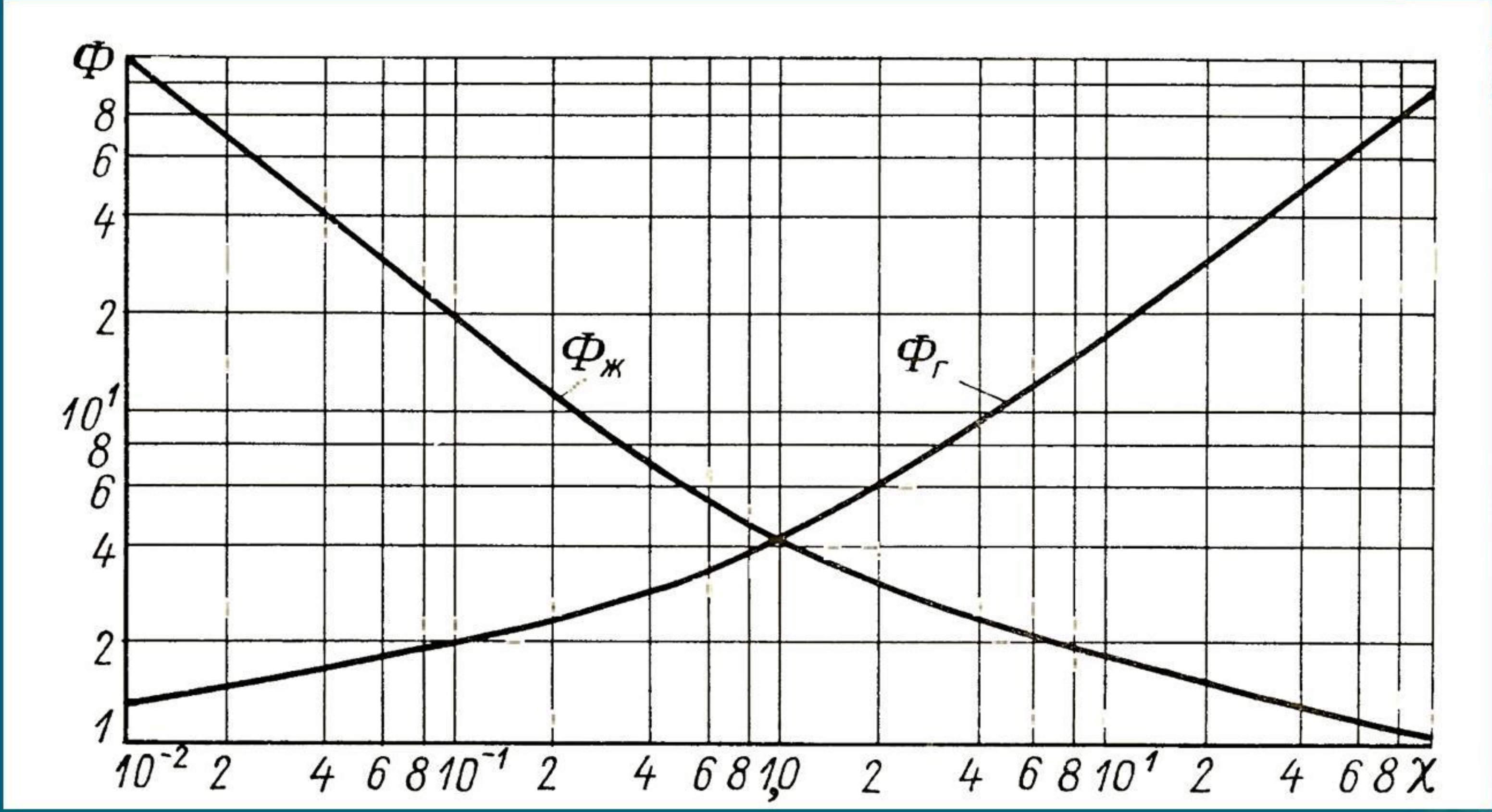
$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{см}} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{ж}} \Phi_{\text{ж}}^2,$$

эмпирика

$$\lambda_{\text{тр}} = A/\mathrm{Re}^n$$

$$X = \left[\frac{(\Delta p/\Delta l)_{\text{ж}}}{(\Delta p/\Delta l)_{\text{г}}}\right]^{\frac{1}{2-n}}$$

Для турбулентного $n = 0 \div 0.25$



$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{см}} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\text{ж0}} (1 - x)^{1,75} \Phi_{\text{ж}}^2,$$

Гомогенный подход

$$v_{см} = v_{ж}(1 - x) + v_{г}x$$

Дарси—Вейсбаха

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{см} = \frac{\lambda_{см}(\rho W)^2 v_{см}}{2D}$$

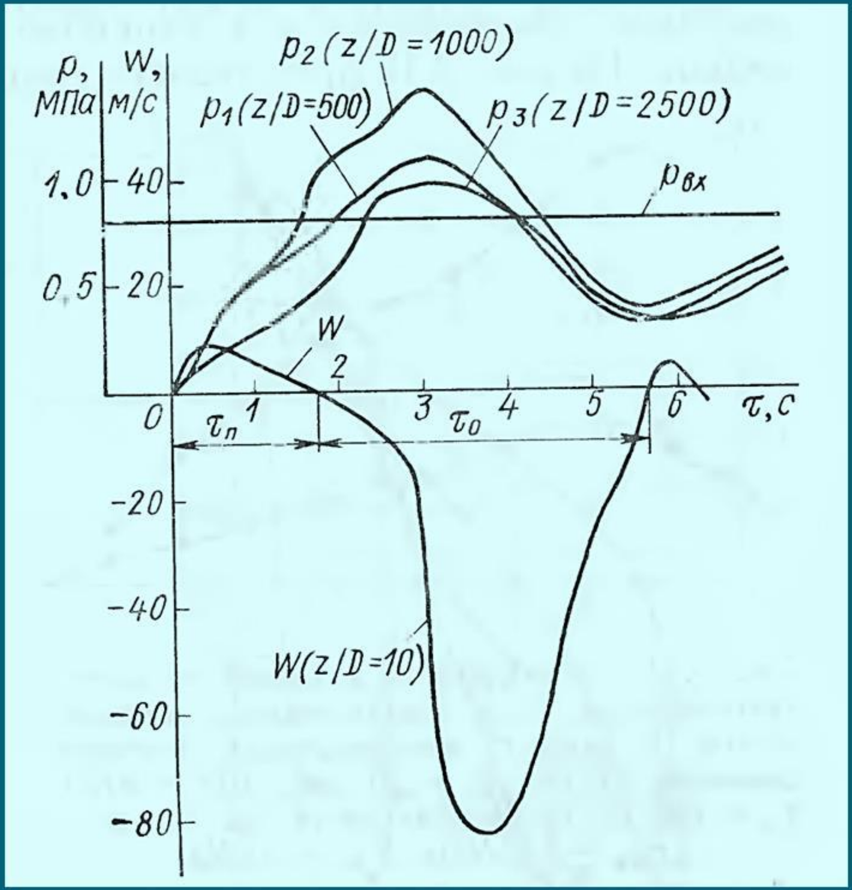
$$\lambda_{см} = \psi\lambda_{тр}$$

Обычно $\psi=1$

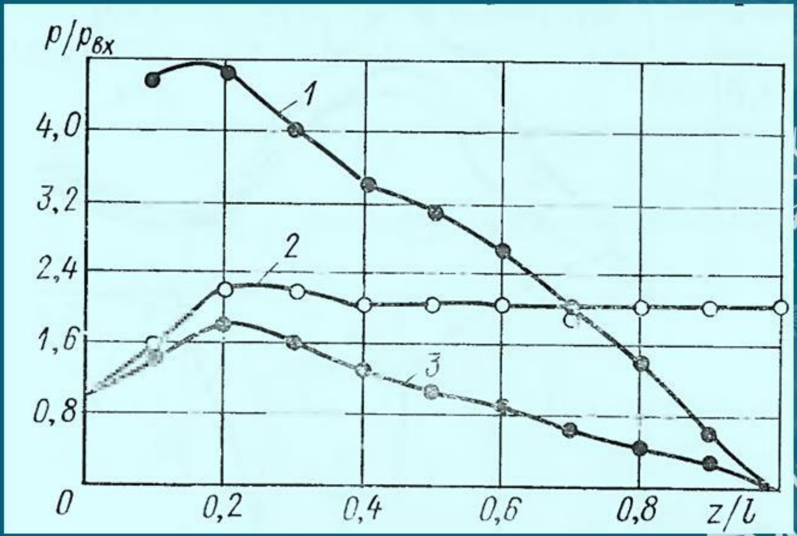
Область на участки что в одном подходе, что в другом

Нестационарные явления в криогенных трубопроводах

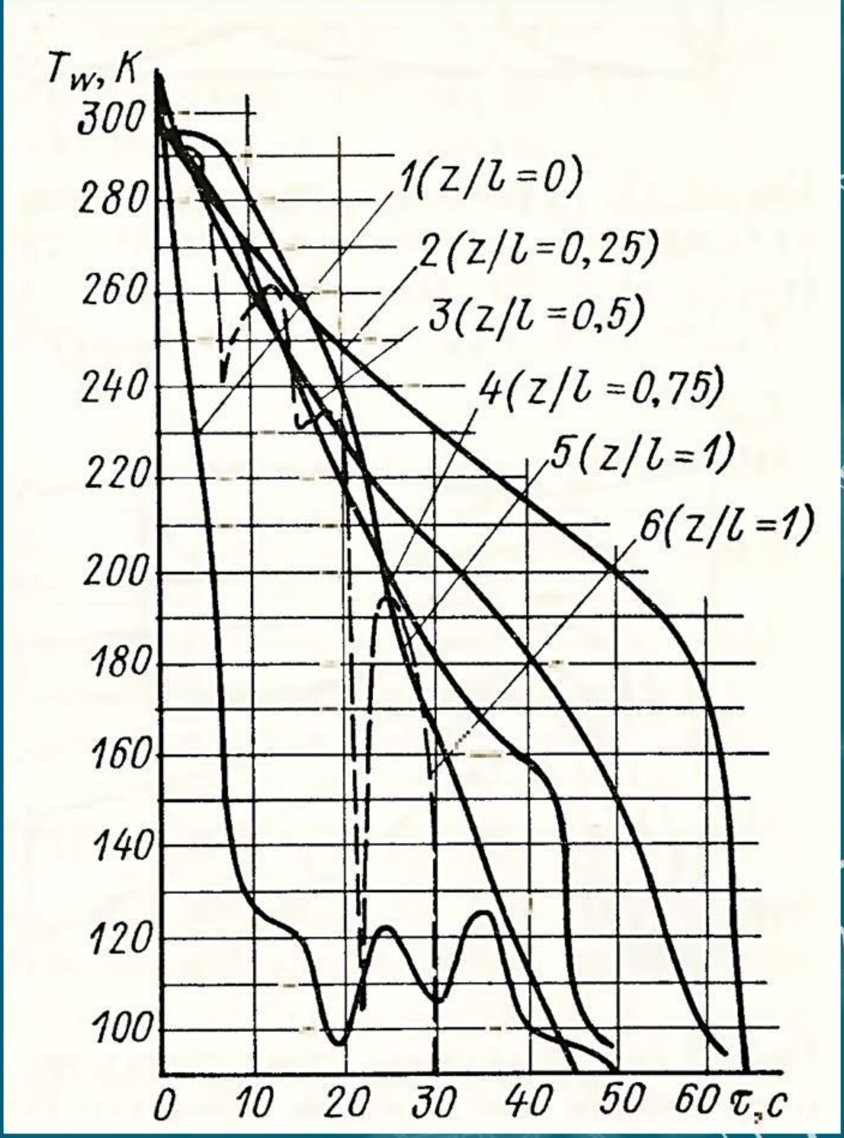
Типичная картина затекания в теплый длинный трубопровод



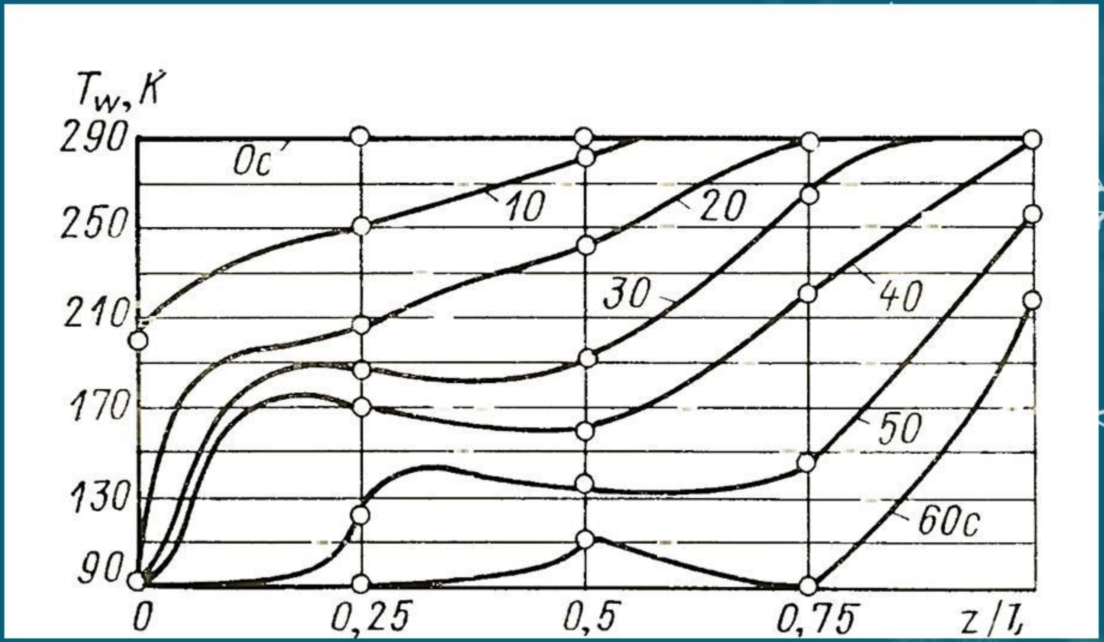
Момент максимального давления



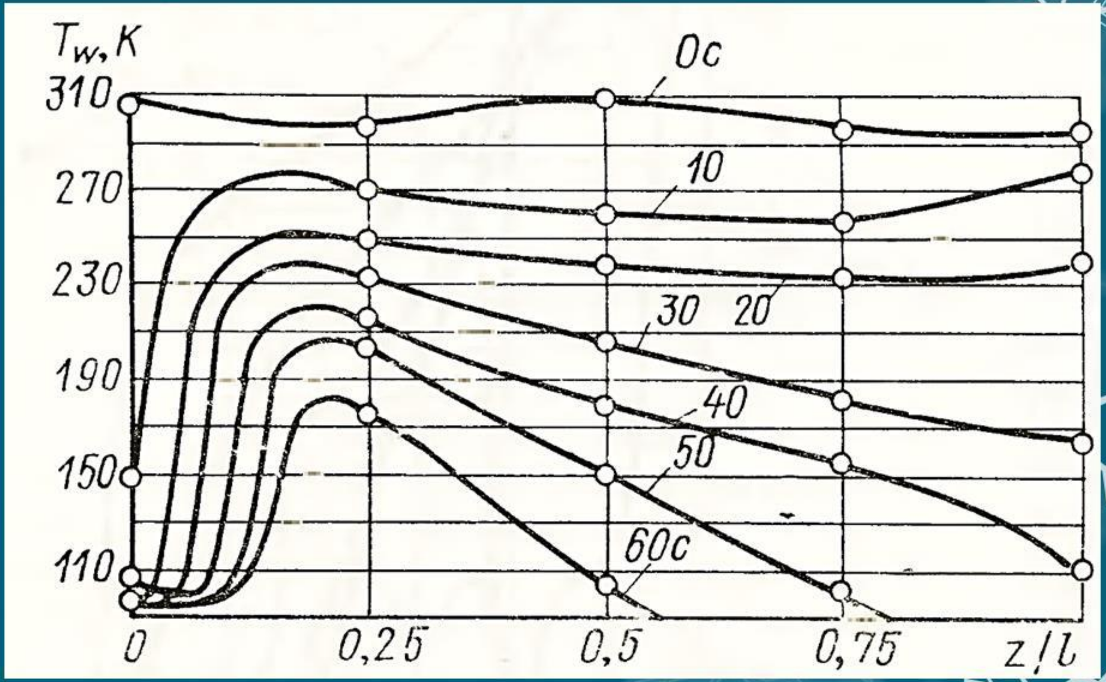
Типичная картина изменения температуры потока по длине трубопровода во времени (жидкий кислород).



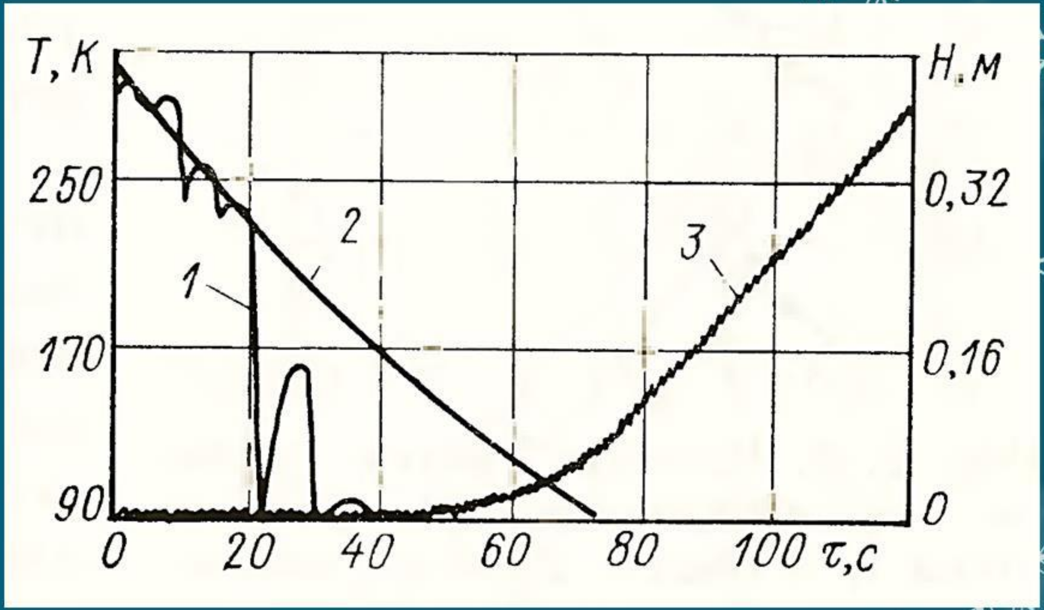
Азот –
длинный трубопровод



Кислород –
средний трубопровод



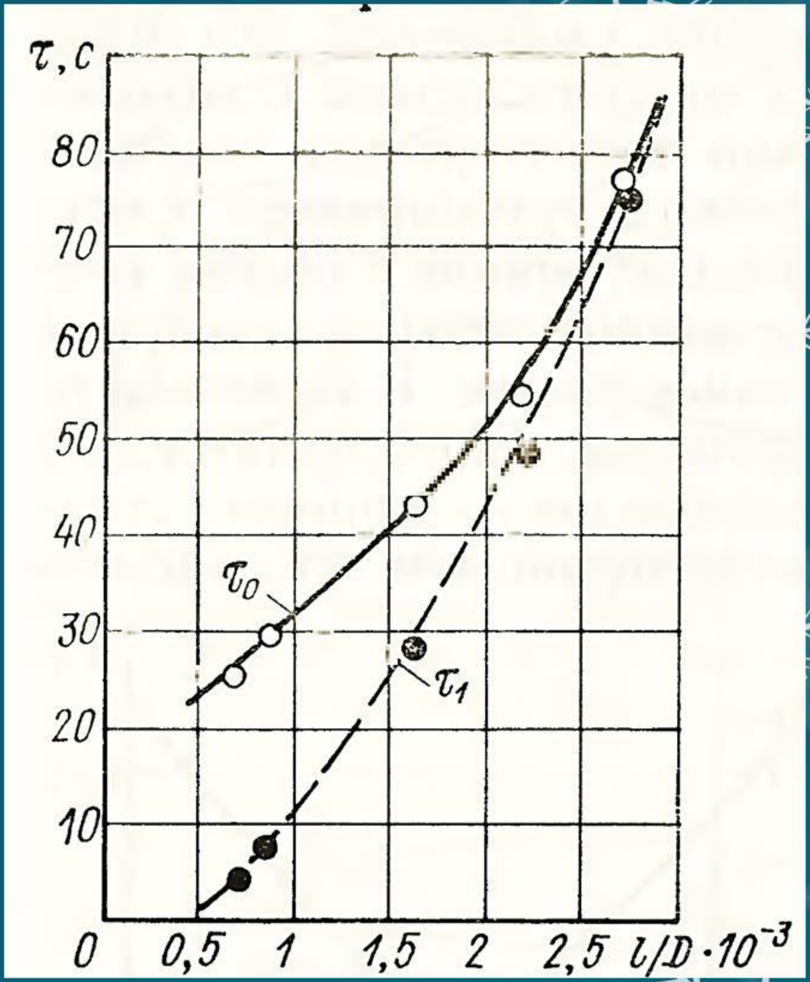
Кислород –
средний трубопровод



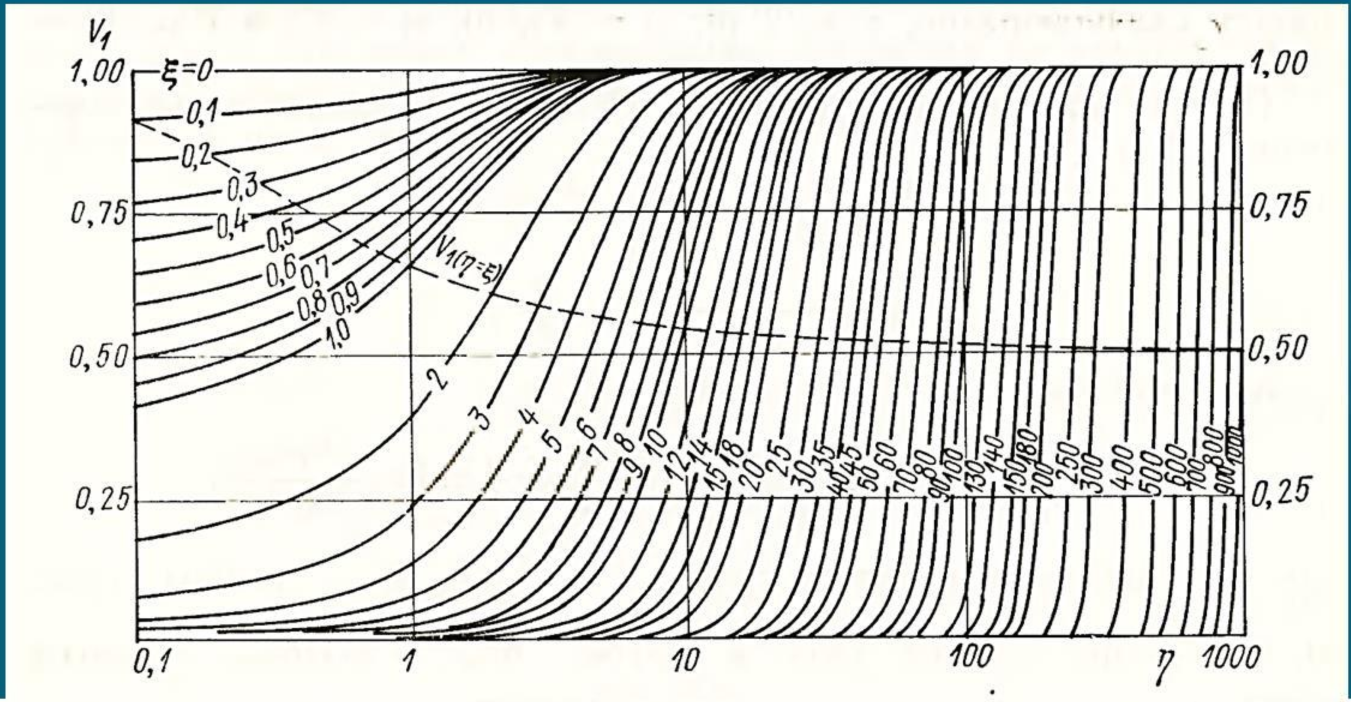
1 – температура пара на выходе
2 – средняя температура стенки
3 – уровень жидкости в наливаемом сосуде

1- время истечения газа
0 – полное охлаждение (кислород)

Короткие - < 500 калибров
Длинные - > 1500÷2000 калибров



Расчет времени прогрева – Гидродинамика и Теплопередача.
Для упрощенной схемы для стационарного расхода:



Изменение температуры потока при охлаждении (нагреве) трубопроводов газом с постоянным расходом $V_1 = f(\xi, \eta)$;

$$\left[V_1 = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_{вх}}; \quad \xi = \frac{4\alpha}{\rho_г c_{рг} W} \frac{z}{D}; \quad \eta = \frac{4\alpha(\tau - z/W)}{\rho_W c_W \delta} \right]$$

$$\tau = \frac{M_W c_W}{(\alpha F)^{0,3} (G c_{p_г})^{0,7}} \text{ при } \xi \leqslant 100;$$

$$\tau = 1,17 \frac{M_W c_W}{G c_{p_г}} + 52,5 \frac{M_W c_W}{\alpha F} \text{ при } \xi > 100.$$

Газ при $\alpha F / (G c_{p_г}) \gg 1$

Гидравлический удар

$$\frac{\partial (f\rho W)}{\partial \tau} + W\frac{\partial (f\rho W)}{\partial z} + (1+\delta)\frac{f\partial p}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial (f\rho)}{\partial \tau} + \frac{\partial (f\rho W)}{\partial z} = 0.$$

$$\rho = \rho_0\left(1 + \frac{p - p_0}{K_ж}\right);$$

$$f = f_0\left(1 + k\frac{p - p_0}{E}\right),$$

Рассматриваемые изменения давлений $p - p_0$ малы по сравнению с E и $K_ж$, которые оцениваются числами порядка $E = 2\cdot 10^5$ МПа (сталь) и $K_ж = 2\cdot 10^3$ МПа (вода).

$k\,(p - p_0)^2/(K_ж E)$ → 0

$$f\rho = f_0\rho_0\left[1 + \left(\frac{1}{K_{ж}} + \frac{k}{E}\right)(p - p_0)\right]$$

$$K = K_{ж}E/(E + kK_{ж})$$

$$a^2 = K/\rho_0$$

$$\frac{\partial(f\rho)}{\partial\tau} = \frac{f}{a^2}\,\frac{\partial p}{\partial\tau}$$

$$-\rho\frac{\partial W}{\partial\tau} = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\lambda_{тр}\rho W\,|W|}{2d};$$

$$-\rho\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{a^2}\,\frac{\partial p}{\partial\tau}.$$

Нестационарности процессов

$$\frac{dp}{p\,d\tau}\frac{2L}{a} \ll 1$$

Гейзерный эффект
Стержневое течение при пленочном кипении
Приток тепла через арматуру и резкое открытие
Заполнение тупикового газопровода

ВСЕ ЭТО УЧИТЫВАЕТСЯ В РАБОТЕ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЕ И ПНЕВМОКЛАПАНАХ