



# **КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ОДНОФАЗНЫХ СРЕДАХ**

**(продолжение 4)**

## Свободная (естественная) конвекция



на различные части жидкости действуют разные массовые силы (гравитационные, центробежные, электромагнитные и др.).

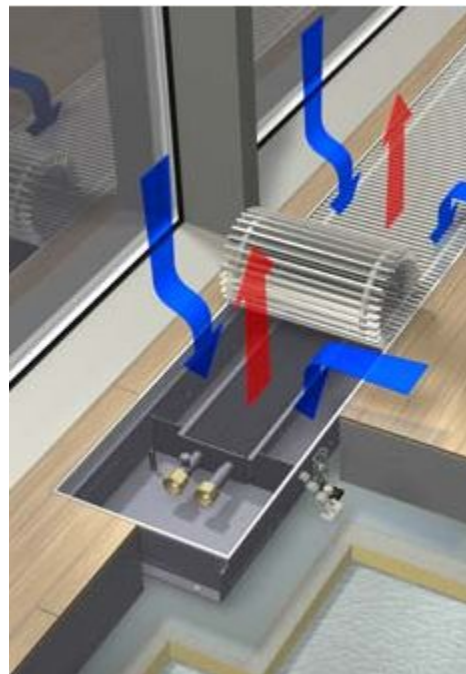
Пример:

Разность температур между поверхностью тела и окружающей средой  $\rightarrow$  градиент плотности  $\rightarrow$  движение жидкости  $\rightarrow$  перенос тепла.

# Свободная конвекция

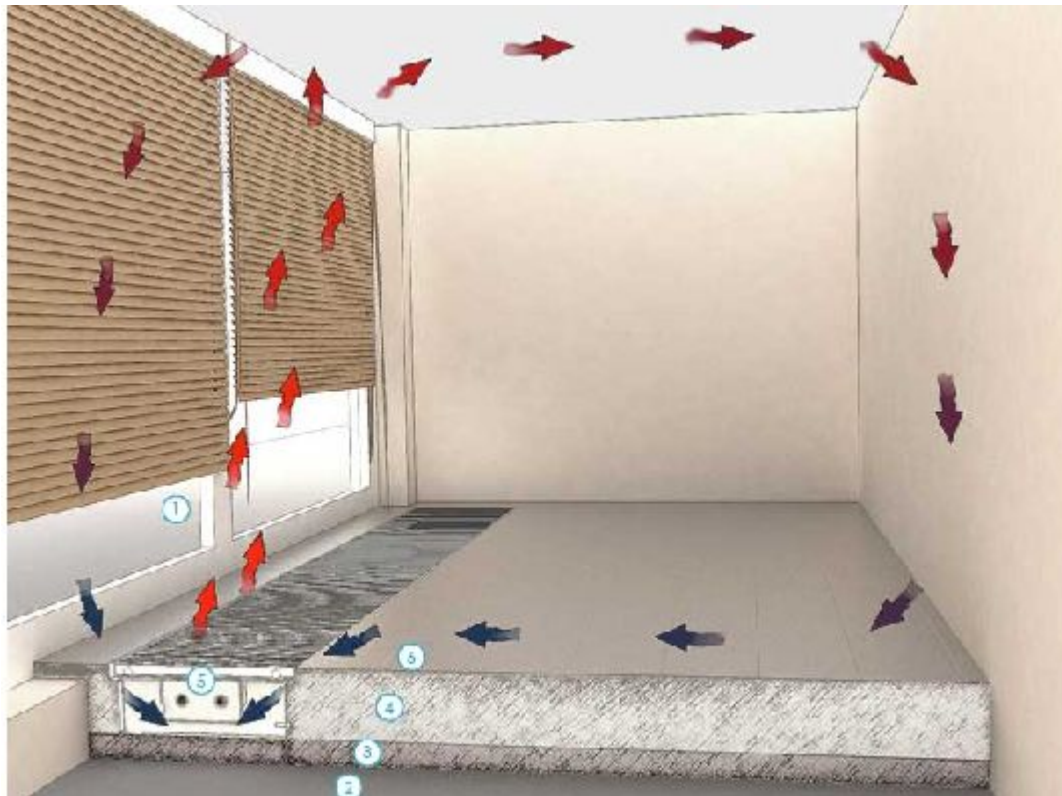


масляный радиатор



Встраиваемые в полу  
конвекторы

# Свободная конвекция



отопительный канал

## Свободная конвекция



Пассивное охлаждение материнской платы  
за счет естественной конвекции

## Свободная конвекция

Пусть свободную конвекцию вызывает разность плотностей  $\Delta\rho$   
выталкивающая сила  $(g \cdot \Delta\rho \cdot l)$  скоростной напор  $(\rho \cdot W^2)$

имеют один порядок

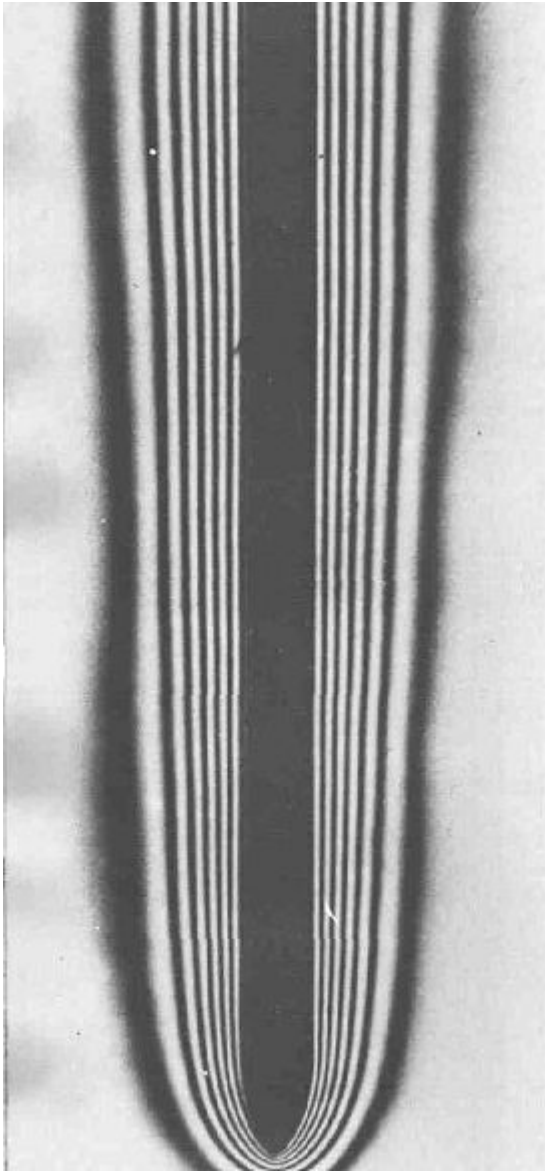
$$\rho W^2 \approx g \cdot \Delta\rho \cdot l$$

скорость при свободном движении  $W = \sqrt{g \cdot (\Delta\rho/\rho) \cdot l}$

$$Re = \frac{W \cdot l}{\nu} = \sqrt{\frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}} = \sqrt{Gr}$$

Число Грасгофа - характеризует режим течения и заменяет при свободном движении число Рейнольдса

## Свободная конвекция



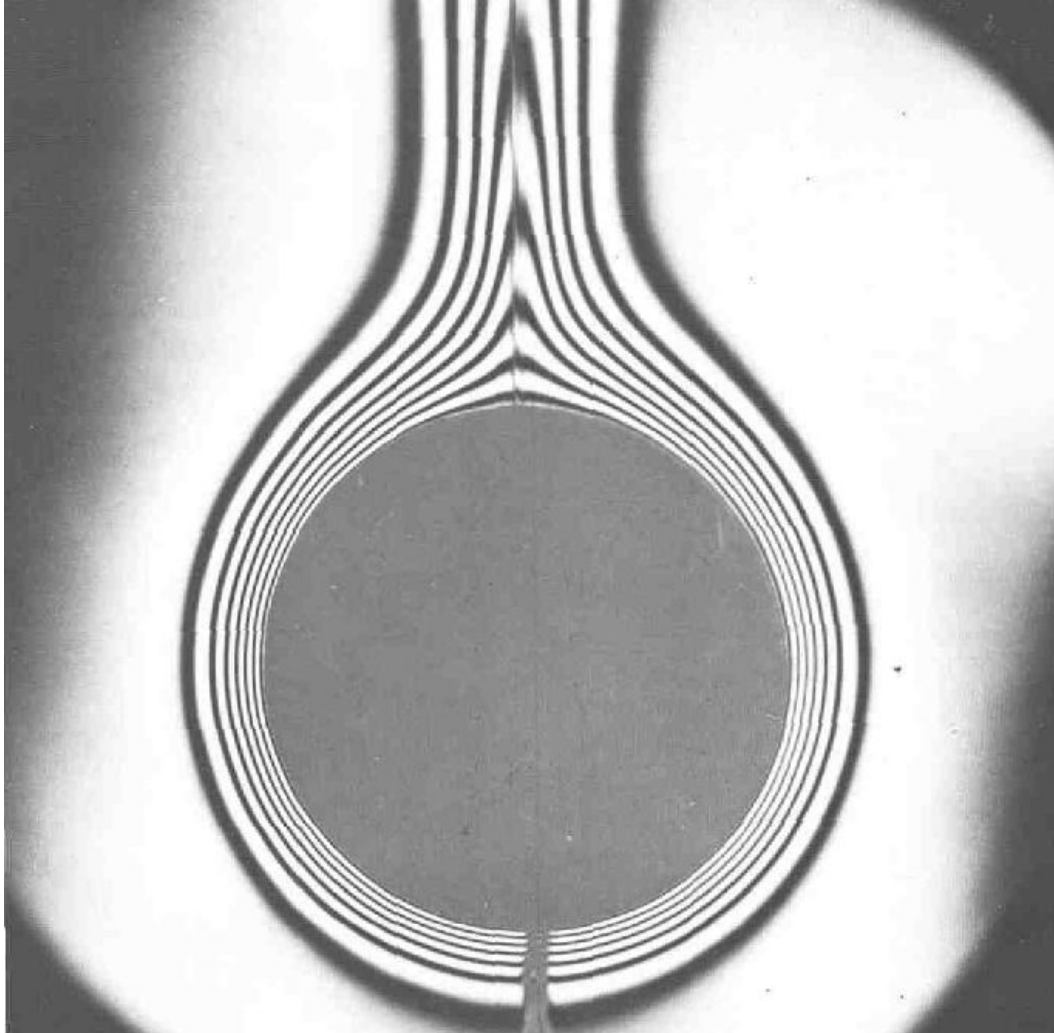
равномерно нагретая пластина в воздухе

установившееся ламинарное течение

линии постоянной плотности,  
которые являются также и  
изотермами, т.к. можно считать  
 $P = \text{const.}$

$$\text{Gr} \sim 5 \cdot 10^6$$

## Свободная конвекция



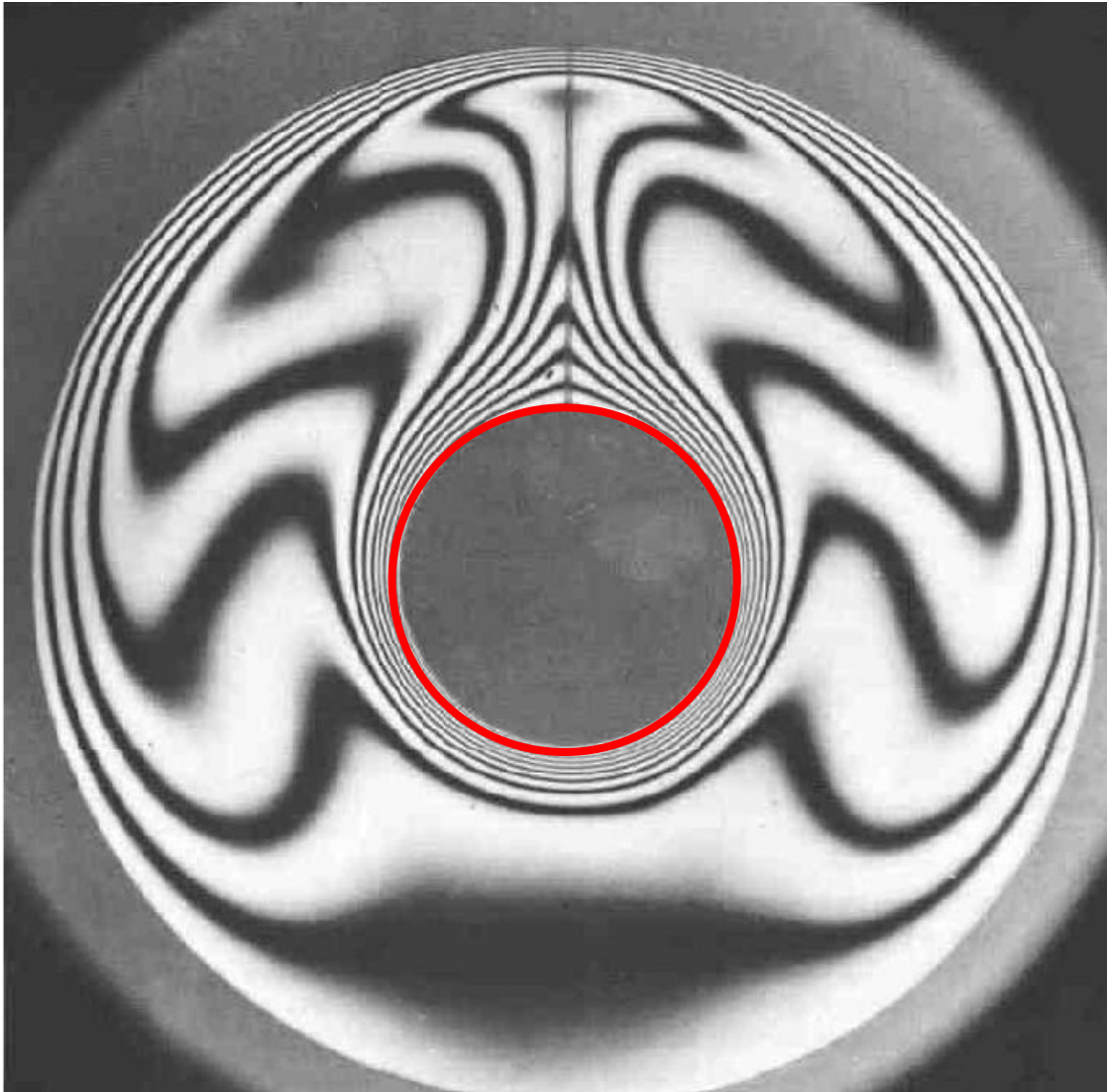
Равномерно нагретый  
цилиндр

$$(t_w - t_f) = 9^\circ\text{C}, Gr = 30000$$

тепловые пограничные  
слои сливаются вверху и  
создают стационарный  
ламинарный факел



## Свободная конвекция



конвективное движение  
между соосными  
цилиндрами

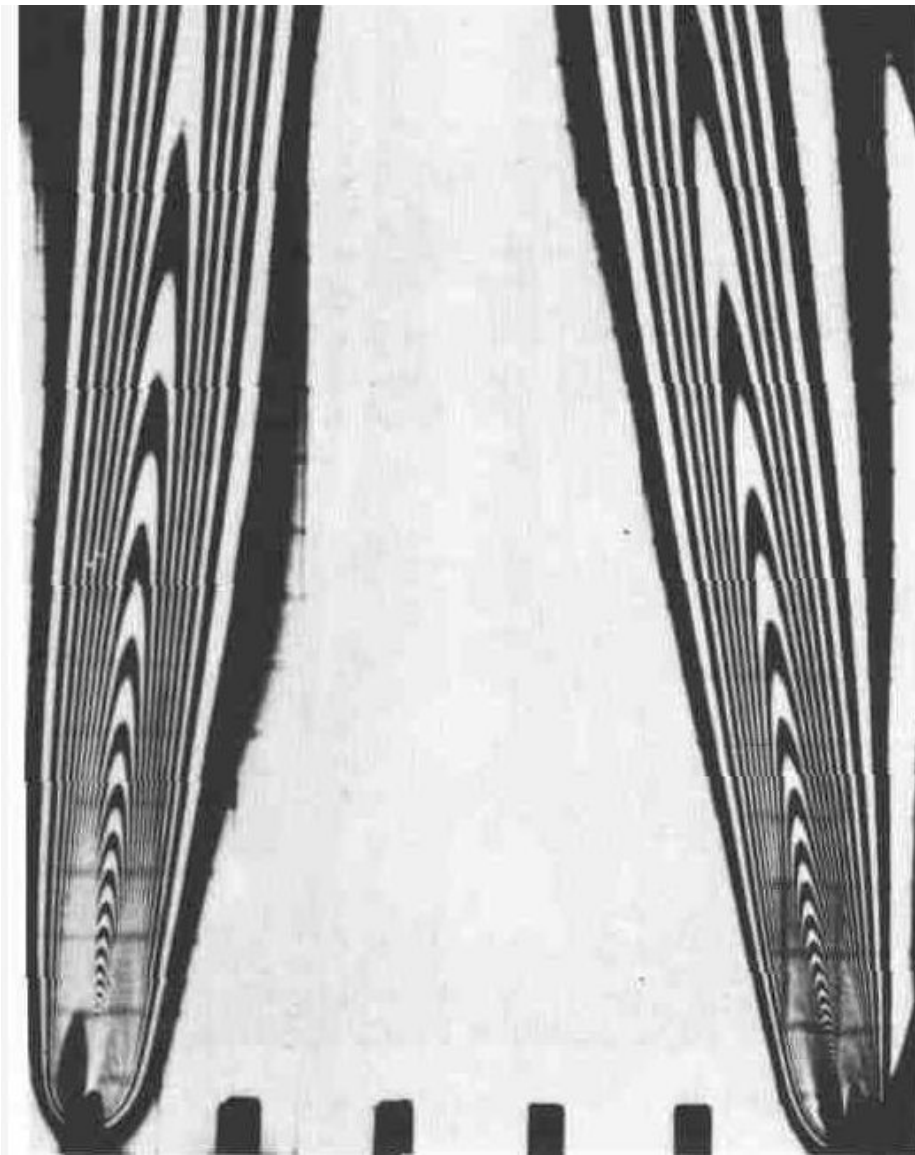
$$D_1/D_2=3$$

$$T_2-T_1=14,5^\circ\text{C}$$

$Gr= 120000$   
(число Грасгофа,  
расчитано по ширине  
зазора)

застойная зона под  
внутренним  
цилиндром

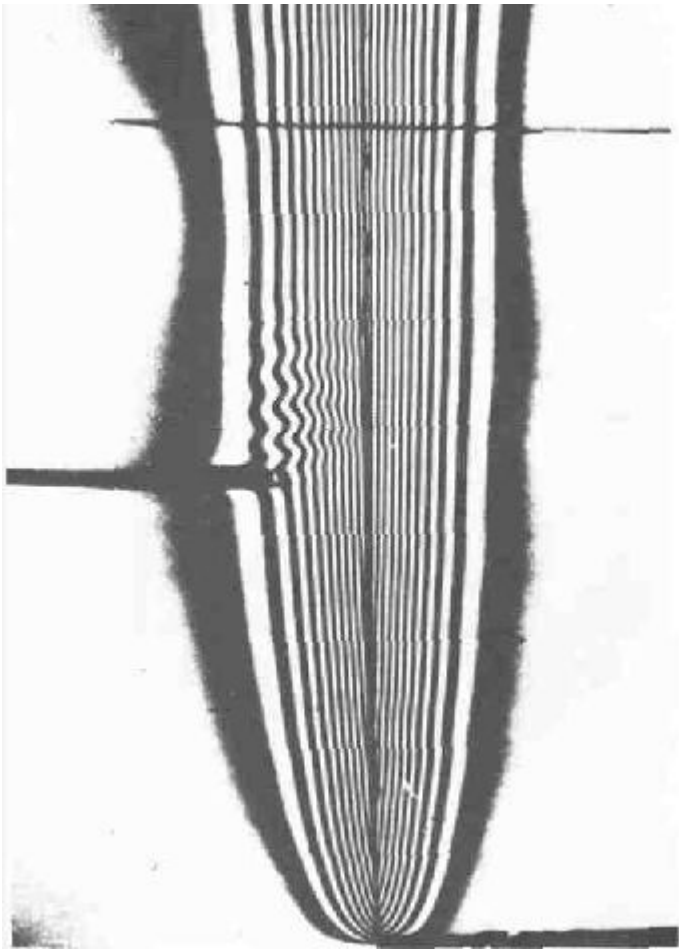
## Свободная конвекция



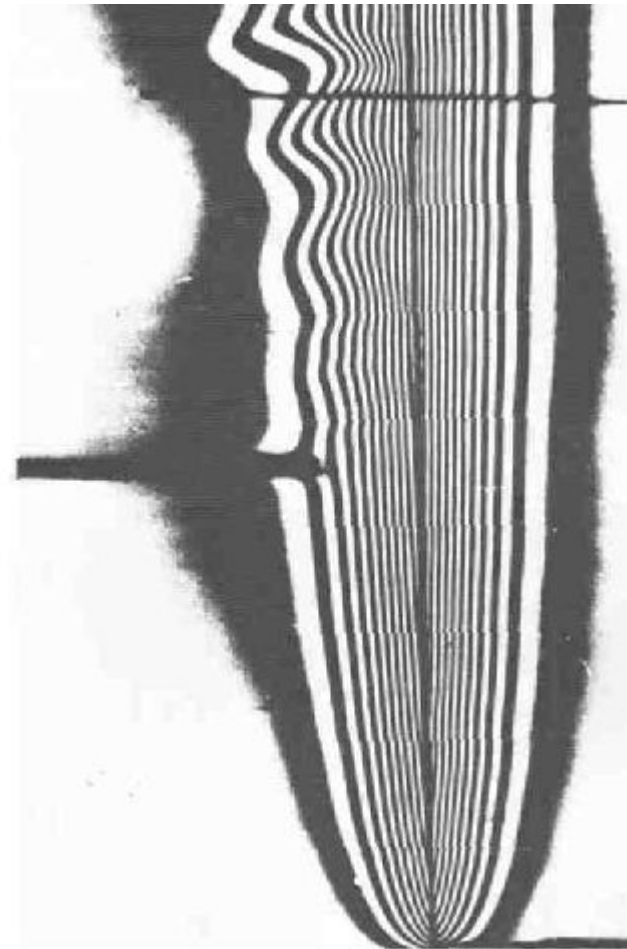
Взаимодействие двух  
одинаковых  
ламинарных факелов

# Свободная конвекция

Неустойчивость конвекции от вертикальной пластины

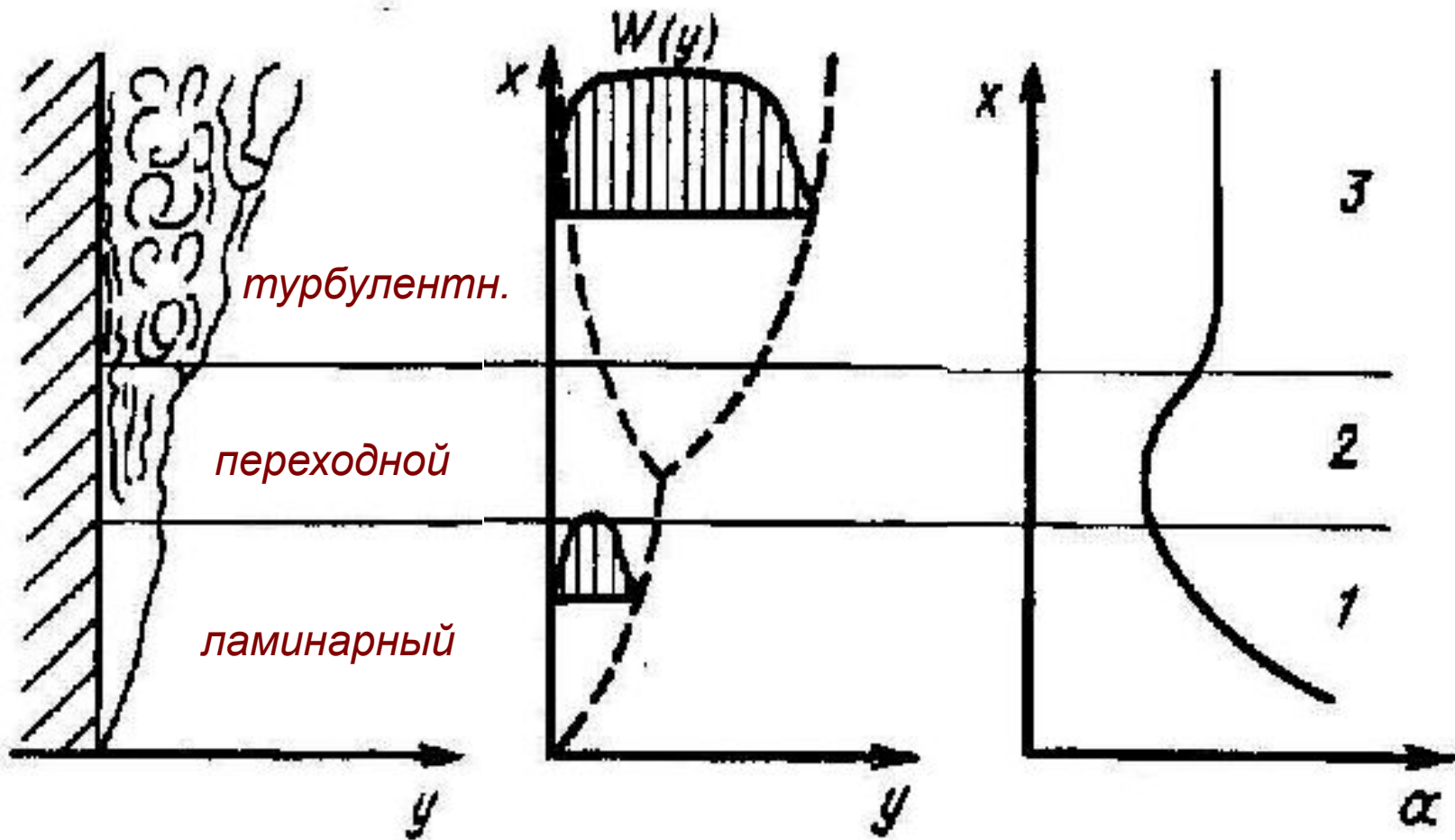


возмущения затухают при частоте 11,5 Гц



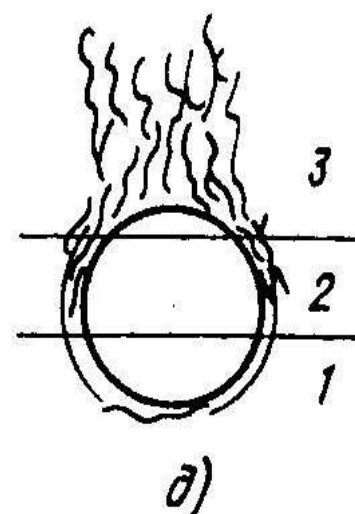
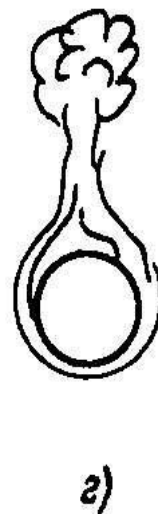
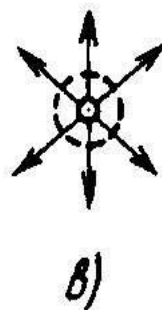
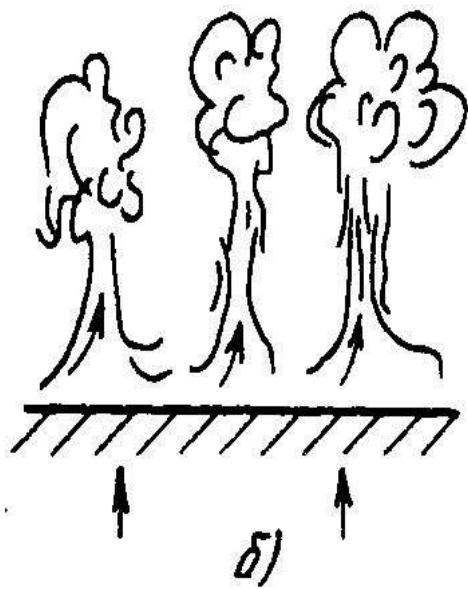
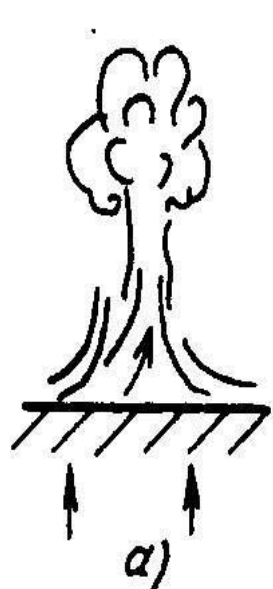
усиливаются при частоте 11,5 Гц

# Свободная конвекция



В турбулентном режиме коэффициент теплообмена не зависит от линейных размеров  $\rightarrow$  *автомоделный режим*

# Свободная конвекция



## Смешанная конвекция

свободная конвекция накладывается на вынужденное течение в каналах

- 1) *параллельная* - совпадение направлений вынужденного и свободного движения;
- 2) *встречная* - противонаправленное движение свободной и вынужденной конвекции;
- 3) *винтовое движение* - на вынужденное течение в горизонтальном направлении накладывается свободное движение, направленное перпендикулярно.

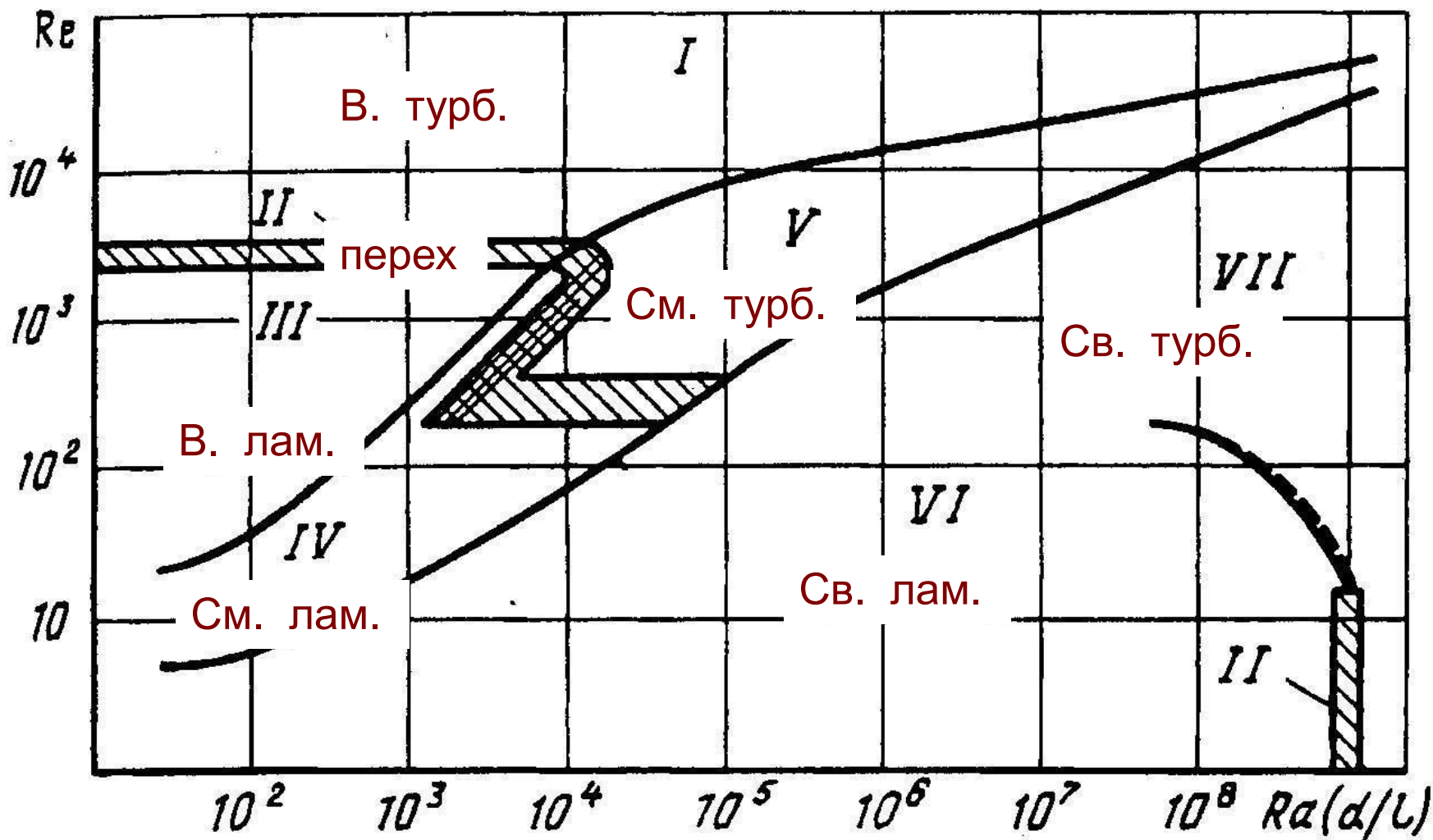
вынужденное течение -  $Re$

свободное течение -  $Ra = Gr \cdot Pr$       число Рэлея

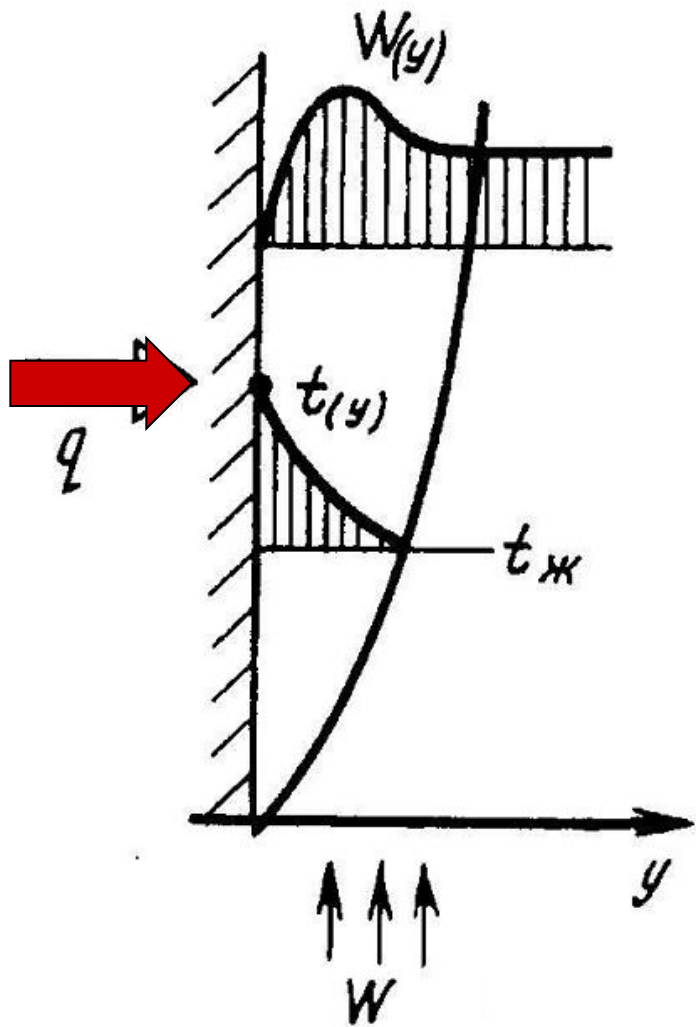


# Границы свободной, вынужденной и смешанной конвекции

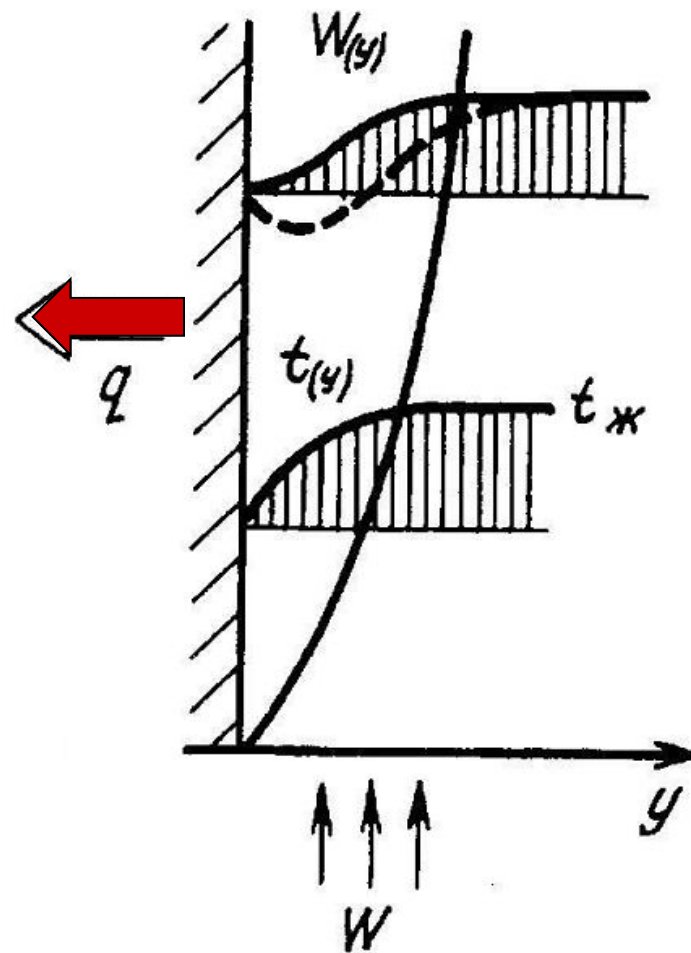
$$Re = \text{fun}[Gr \cdot Pr \cdot (d/l)]$$



# Смешанная конвекция около вертикальной пластины



параллельная



встречная



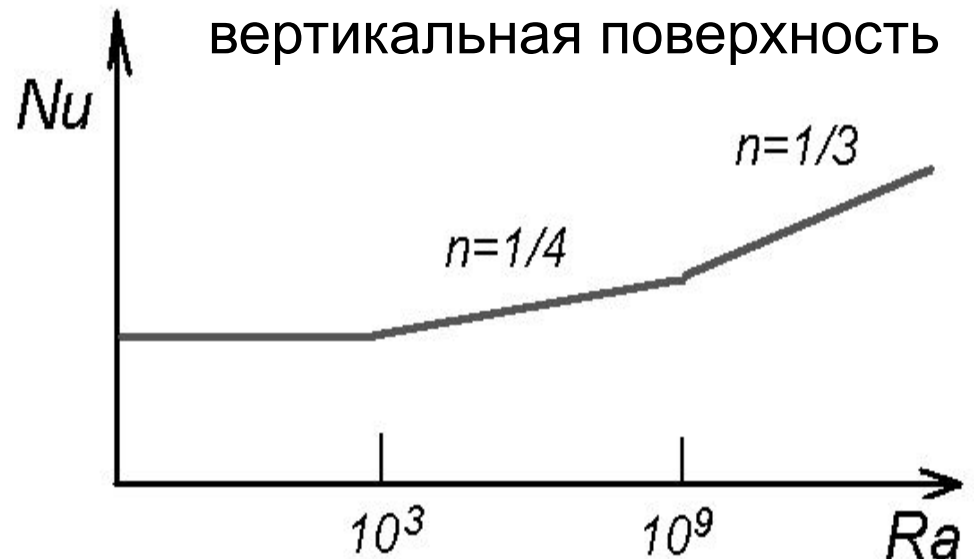
## Расчетные формулы

$$Pr \geq 1$$

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{a}$$

$Ra$	$C$	$n$
$10^{-3} - 10^3$	1,8	0,125
$10^3 - 10^9$	0,5	0,25
$>10^9$	0,15	0,33



## Свободная конвекция

При турбулентном движении

$$Nu \sim (Gr \cdot Pr)^{1/3}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Число Рэлея

$$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \sim \left( \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

$$\alpha \neq f(l)$$

автомодельность

## Свободная конвекция наклонных поверхностей

Пример: охлаждение корпуса реактора снаружи, т.е. охлаждение нагретых поверхностей, обращенных вниз или наклоненных под углом.

Для поверхностей, наклоненных под углом  $\theta$  к вертикали  
вертикальное положение  $\theta = 0$

используется число Релея  $Ra_\theta$

где вместо  $g$  стоит составляющая ускорения силы тяжести, параллельная поверхности  $g \cos\theta$

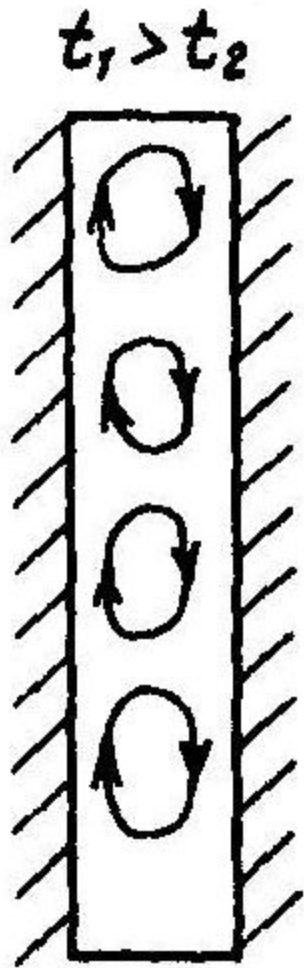
$$Nu = 0,348 Ra_\theta^{1/4}$$

**для  
воздуха**

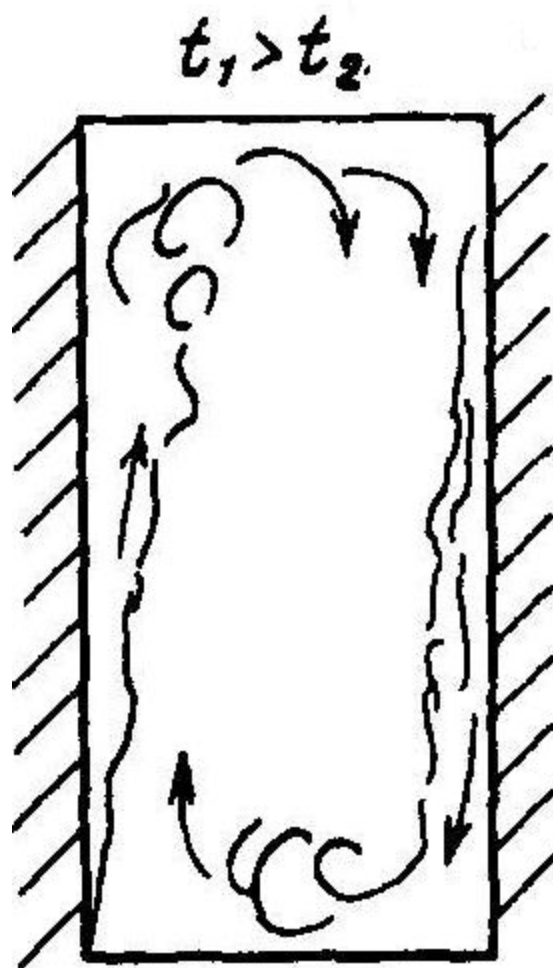
$$Nu = 0,56 Ra_\theta^{1/4}$$

**для воды**

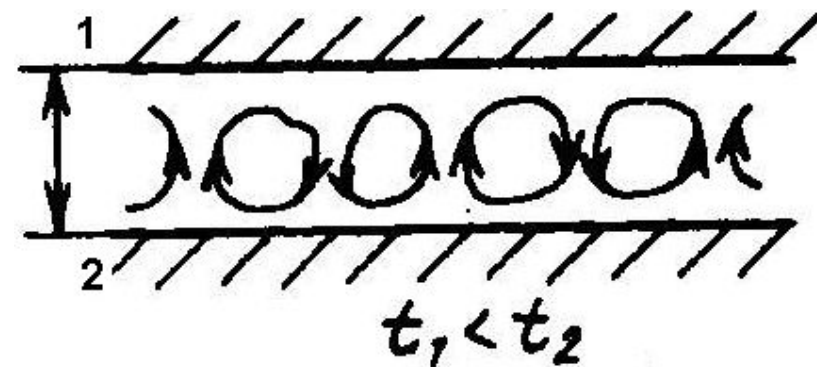
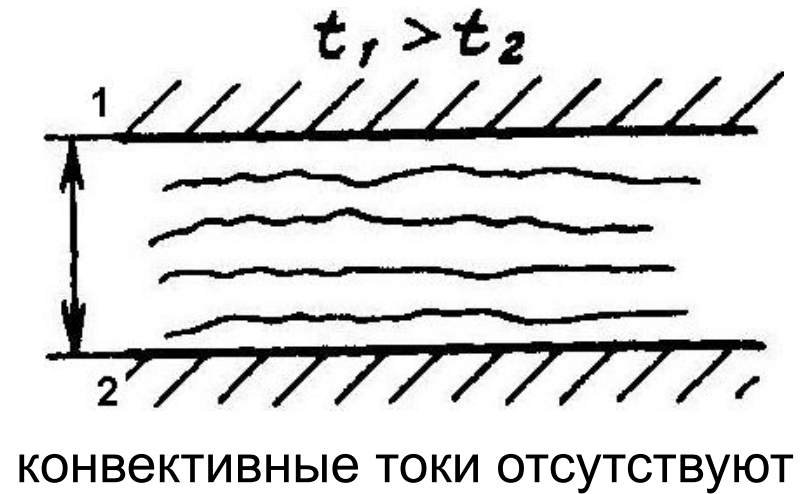
# Свободное движение жидкости в ограниченном пространстве



отдельные  
ячейки



течение по  
всему объему



ячейки Бенара

# Свободное движение жидкости в ограниченном

## пространстве

Теплопроводность в плоском слое  $q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t$

$$q = \frac{\lambda_{ЭК}}{\delta} \Delta t$$

$\lambda_{ЭК} = \lambda \cdot \varepsilon_k$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающей перенос тепла теплопроводностью и конвекцией,

$\varepsilon_k = f(Ra)$  - коэффициент конвекции.

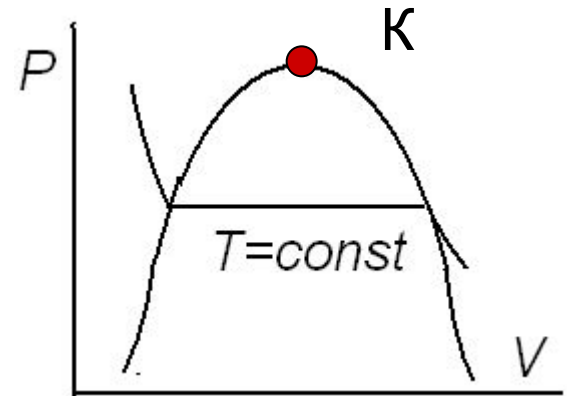
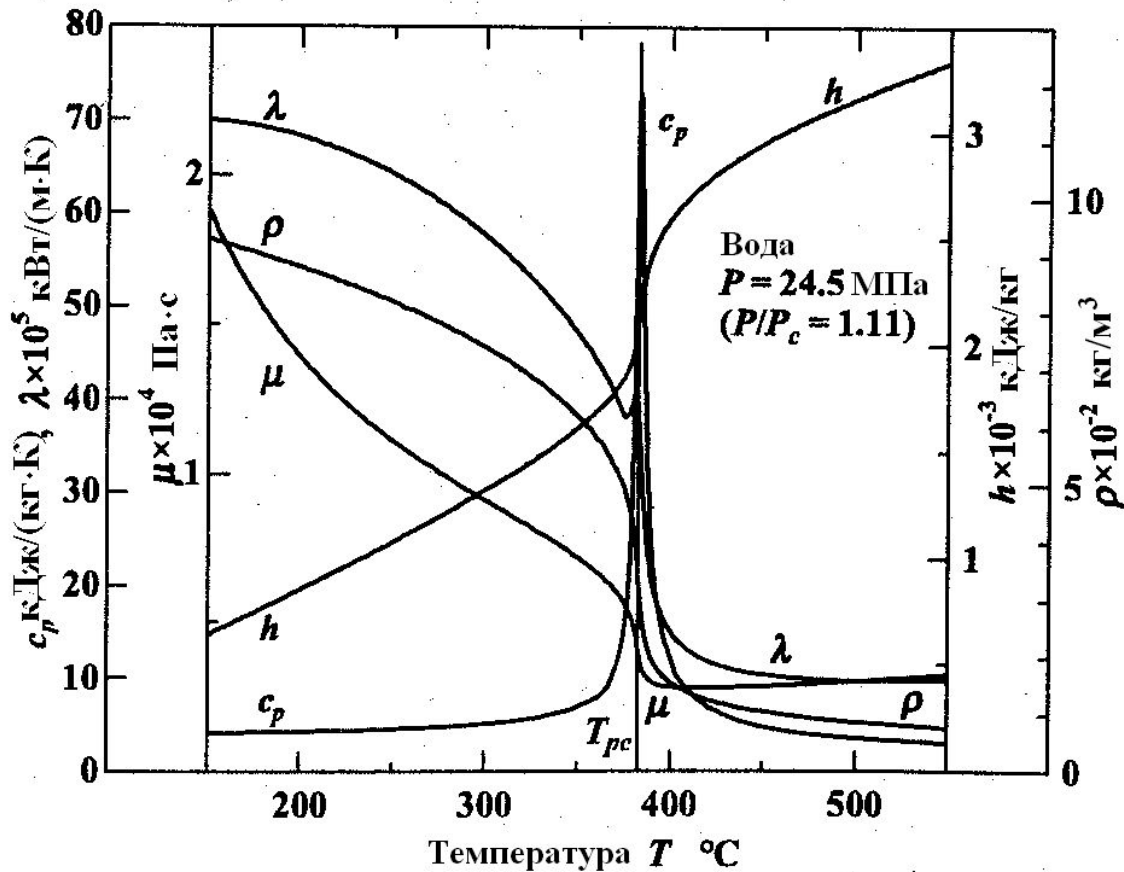
определяющий размер – толщина слоя  $\delta$

определяющая температура  $t_{cp} = (t_{w1} + t_{w2})/2$

При  $Ra < 10^3$ ,  $\varepsilon_k = 1$  конвекция не вносит вклада в перенос тепла  
При  $Ra > 10^3$   $\varepsilon_k = 0,18 \cdot Ra^{0,25}$

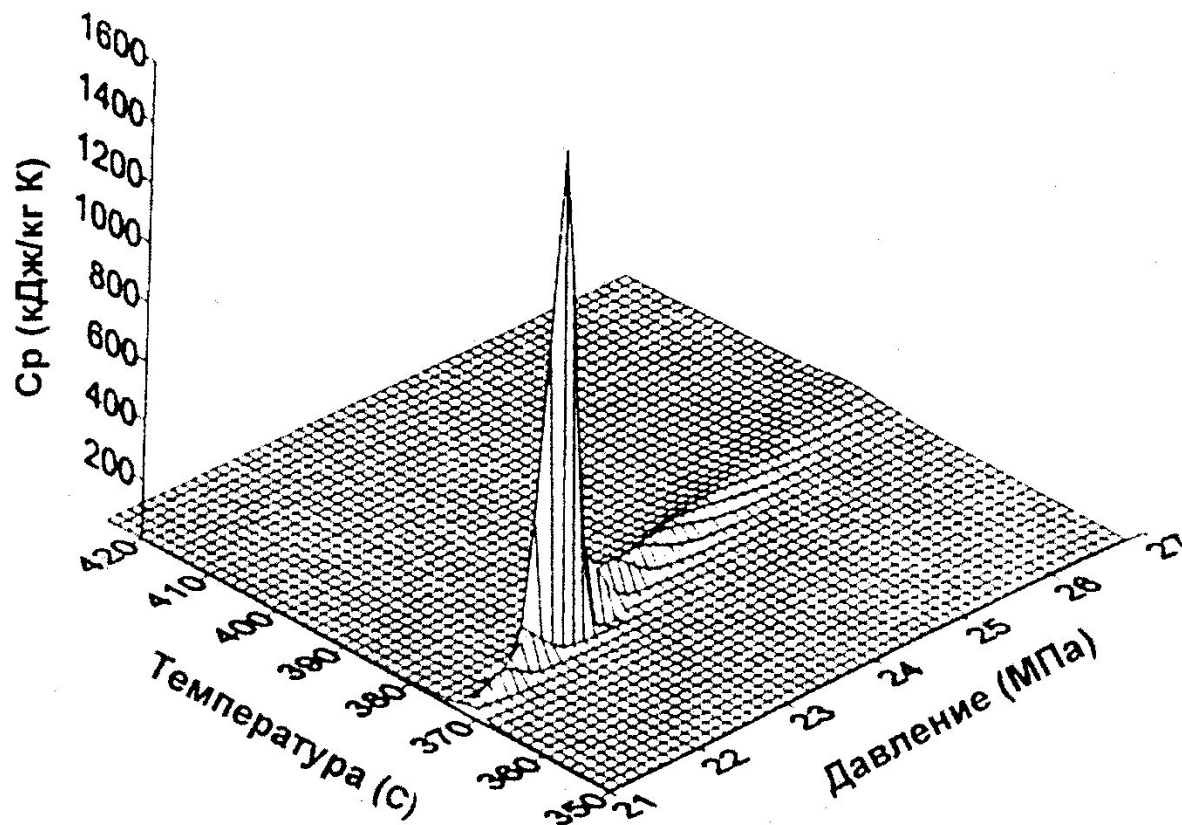
# Теплообмен в околокритической области

сильное изменение свойств в зависимости от температуры



$t_m$  — псевдокритическая температура

## Изменение свойств воды при СКД



Теплоемкость воды

# Теплообмен в околкритической области

вода  $P_{кр} = 22,12$  МПа,  $T_{кр} = 647,3$  К

$$Nu = Nu_o \left( \frac{\overline{c_p}}{c_p} \right)^n \cdot \left( \frac{\rho_{см}}{\rho} \right)^m \cdot \varphi(K)$$

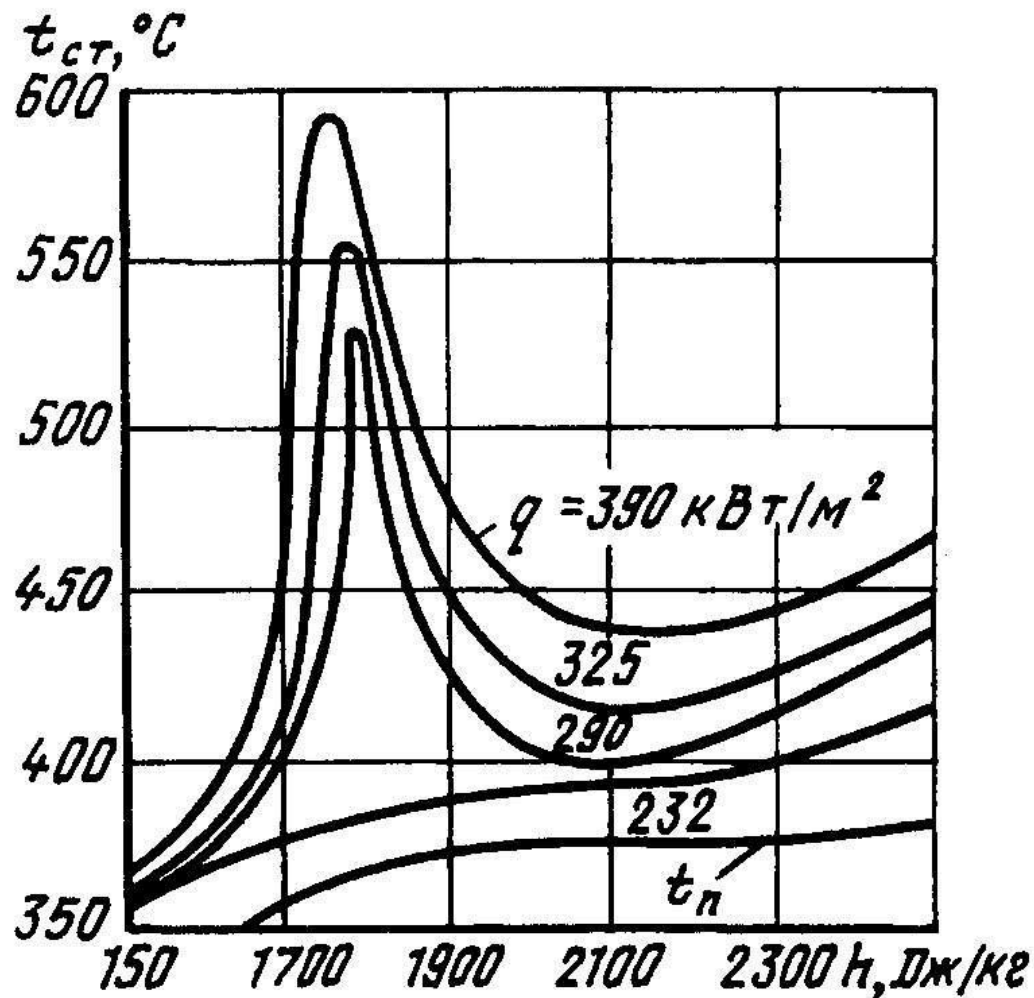
$$\overline{c_p} = \frac{(h_w - h_f)}{(T_w - T_f)}$$

- среднеинтегральная  
теплоемкость теплоносителя в  
интервале  $(T_w - T_f)$ ,



# Теплообмен в околокритической области

режимы с ухудшенным теплообменом, когда при нагревании обнаруживаются всплески температуры стенки



# Перенос газа при высоких скоростях

Два основных эффекта:

- 1) в пограничном слое около стенки кинетическая энергия частиц благодаря торможению переходит в тепло;
- 2) необходимо учитывать сжимаемость потока

$$W = \text{var} \quad \longrightarrow \quad P = \text{var} \quad \longrightarrow \quad \rho \neq \text{const}$$

$$T = \text{var}$$

свойства газа должны рассматриваться  
как переменные

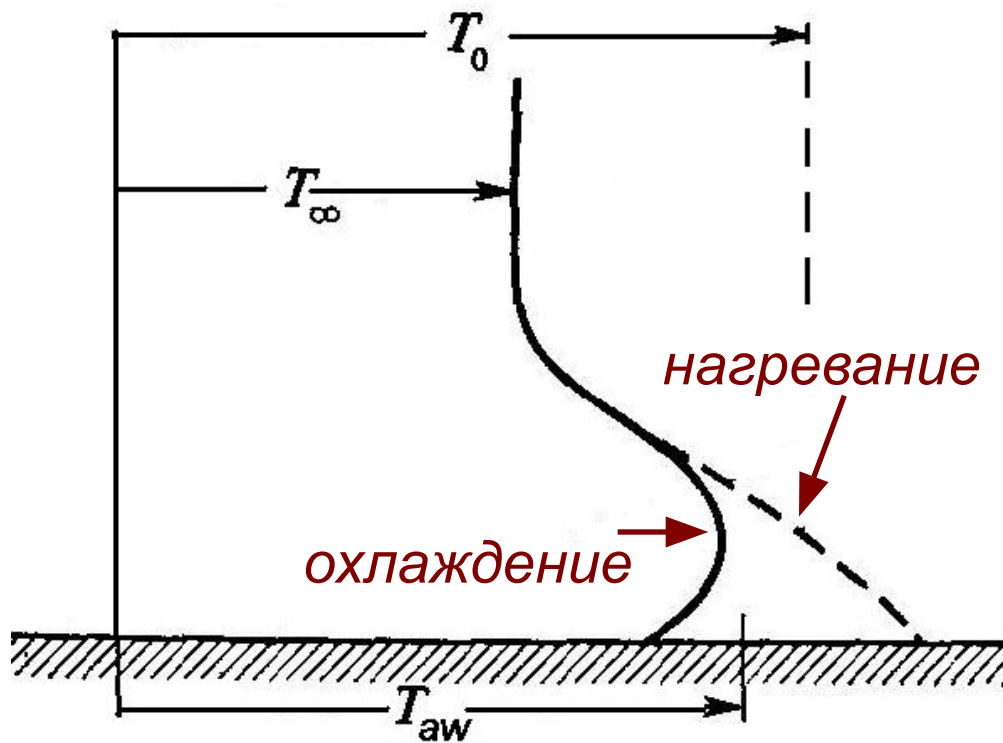
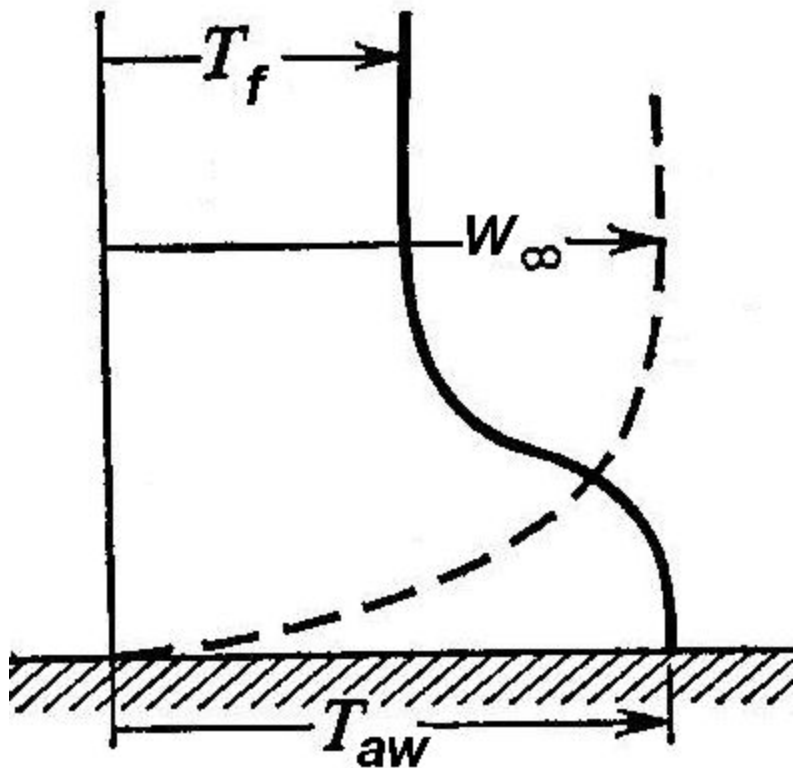
## Перенос газа при высоких скоростях

Характеристики газового потока определяются скоростью и двумя параметрами состояния

*Статические параметры*  $p_{cm}$ ,  $t_{cm}$  изменяются приборами, которые движутся вместе с газом, т.е. скорость их относительно потока равна нулю,

*Динамические*  $p_m$ ,  $t_m$  (параметры торможения) - измеряются неподвижными приборами.

# Перенос газа при высоких скоростях



## Перенос газа при высоких скоростях

Газ, со скоростью  $W_o$  и температурой  $t_o$  тормозится без теплообмена с окружающей средой.

Температура заторможенного газа (температура торможения) из уравнения теплового баланса

$$Q = G \left[ \left( h_o + \frac{W_o^2}{2} \right) - \left( h_m + \frac{W_m^2}{2} \right) \right] = 0$$

$h_o$ ,  $W_o$  - теплосодержание и скорость газа до торможения,  $h_m$  – теплосодержание газа после торможения,  $W_m=0$  (газ заторможен).

$$h_o + W_o^2 / 2 = h_m$$

$$c_p t_o + W_o^2 / 2 = c_p t_m$$

$$t_m = t_o + W_o^2 / 2 c_p$$

## Перенос газа при высоких скоростях

Кинетическая энергия потока 1 кг газа ( $W^2/2$ )

Энтальпия ( $c_p T$ )

$$\frac{W^2/2}{c_p T} = \frac{k-1}{2} \cdot \frac{W^2}{a^2} = \frac{k-1}{2} M^2$$

$$k = c_p / c_v$$

$$a = \sqrt{kRT} = \sqrt{c_p T (k-1)} \quad \text{- скорость звука}$$

После подстановки

$$t_m = t_o \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

$M$ -число Маха

## Перенос газа при высоких скоростях

Из аналогии Рейнольдса применительно к течению газа с высокой скоростью

$$t_o > t_{cm}$$

Обозначим

$$t_o - t_{cm} = \vartheta$$

Если частица газа массой  $\Delta m$ , имеющая температуру  $\vartheta$  и скорость  $W$  тормозится в слое у стенки то она передаст стенке количество тепла состоящее из внутренней

$$(\Delta m c_p \vartheta)$$

и кинетической энергии  $(\Delta m W^2 / 2)$ .

Полное количество тепла, полученное стенкой от одной частицы :

$$\Delta q = \Delta m \left( c_p \vartheta + W^2 / 2 \right)$$

## Перенос газа при высоких скоростях

В реальных условиях переход кинетической энергии в тепловую не является адиабатическим, а сопровождается обменом теплом между слоями газа.

Если поверхность в потоке газа изолирована, то температура ее называется *адиабатической температурой*:

$$t_{a.c.} = t_0 \left( 1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

$$r = (t_{a.c.} - t_0) / (t_m - t_0) \quad \text{коэффициент восстановления}$$

$(t_m - t_0)$  - есть падение температуры, которое испытывает газ при адиабатическом разгоне его от  $W=0$  до  $W$ .



## Перенос газа при высоких скоростях

Если газ затормозить с помощью какого-либо тела, то  $t_{a. c.} < t_m$

Для ламинарного пограничного слоя  $r \approx \sqrt{\text{Pr}}$

для турбулентного  $r \approx \sqrt[3]{\text{Pr}}$

В общем случае коэффициент восстановления зависит от формы тела и от функции  $r=f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Pr}_t)$ .

## Перенос газа при высоких скоростях

Сила трения (касательное напряжение) на стенке равна изменению количества движения всех частиц, приходящих на единицу площади в единицу времени

$$\tau = G \cdot W$$

следовательно, плотность теплового потока равна

$$q = G \left( c_p \vartheta + \frac{W^2}{2} \right) = \frac{\tau_o c_p}{W} \left( \vartheta + \frac{W^2}{2c_p} \right)$$

С учетом коэффициента восстановления (более точное выражение):

$$q = \frac{\tau_o c_p}{W} \left[ \left( t_o + r \frac{W^2}{2c_p} \right) - t_{cm} \right]$$

Коэффициент теплообмена относится не к разности температур  $(t_o - t_{cm})$ , а к разности  $(t_{a.c.} - t_{cm})$ .

# Перенос газа при высоких скоростях

Практические расчеты

$$Nu = A Re^{0,8} Pr^{0,4} (T_{a.c.}/T_o)^n$$

$(T_{a.c.}/T_o)^n$  - поправка, учитывающая влияние эффектов высокой скорости

При  $M < 1$  эта поправка мало отличается от единицы.



# Generation IV versus Generation III : enhanced economics and sustainability higher outlet T (nuclear CHP) and closed fuel cycle

**SFR**

*Sodium Fast reactor*

**LFR**

*Lead Fast Reactor*

**GFR**

*Gas Fast Reactor*

**VHTR**

*Very High Temperature Reactor*

**SCWR**

*Supercritical Water Reactor*

**MSR**

*Molten Salt Reactor*



# GEN IV Systems

Gen IV Systems	Neutron Spectrum	Coolant	Fuel	Recycle Process	Outlet Temp.
GFR	Fast	Gas	Carbide	Aqueous (or Pyro)	850°C
LFR	Fast	Pb or Pb/Bi	Metal/ Nitride	Pyro	550-800°C
MSR	Thermal	Salt	Fluoride	Salt process	700°C
SFR	Fast	Na	Metal/ MOX	Pyro/ Aqueous	520-500°C
SCWR	Thermal/ Fast	Supercritical water	Oxide/ MOX	Aqueous	550°C
VHTR	Thermal	Gas	Oxide	Once-through	1000°C



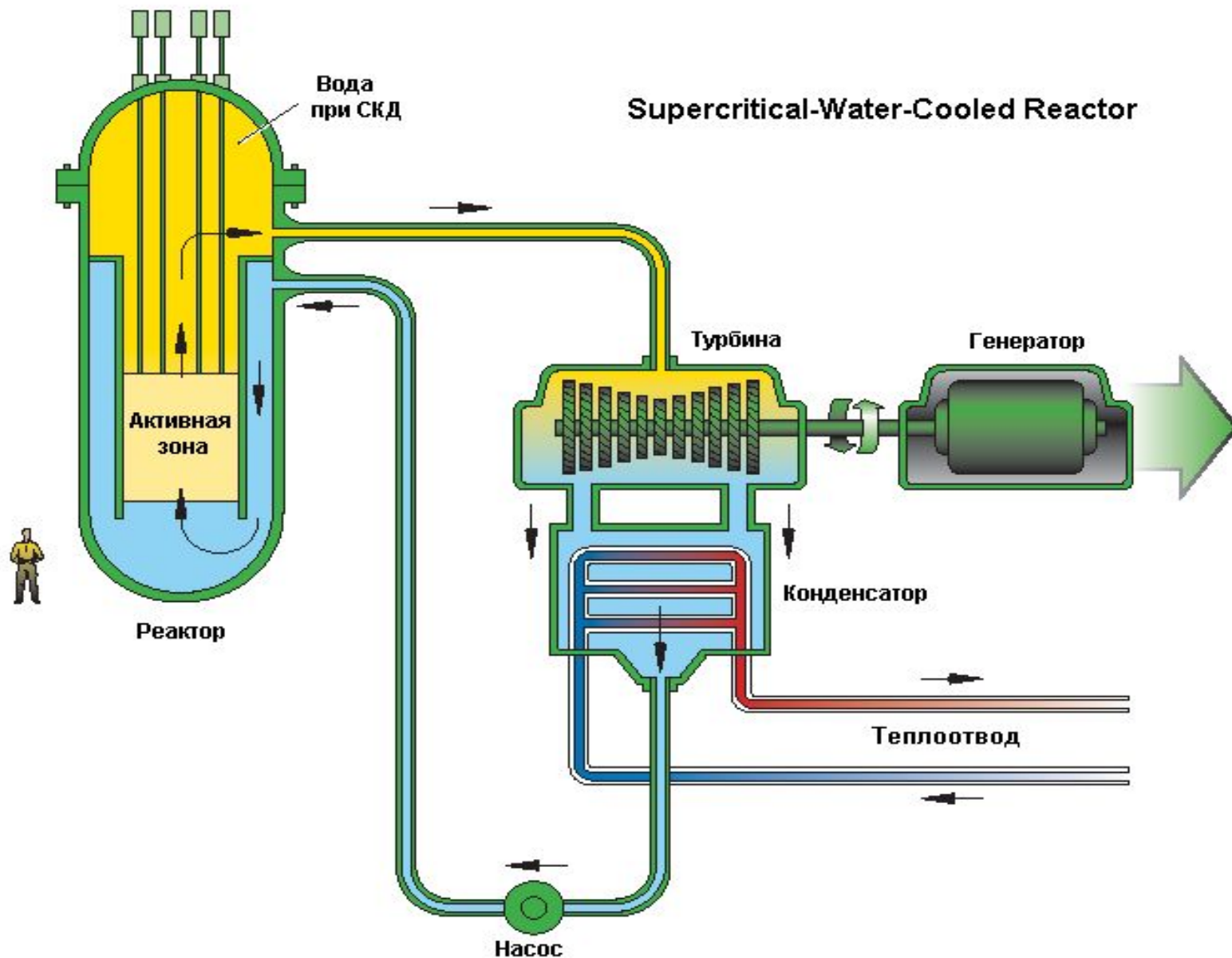


# GEN IV Concepts

Gen IV Systems	Electricity Generation	Hydrogen Production & Cogeneration	Actinide Management	Rating (MWe)
GFR	▲ ▲	▲ ▲	AM	288
LFR	▲ ▲	▲ ▲	AM	50 ~ 150 300 ~ 400 1200
MSR	▲ ▲	▲ ▲	AM	1000
SFR	▲ ▲ ▲	▲	AM	150 ~ 500 500 ~ 1500
SCWR	▲ ▲ ▲	▲	Once Thru or AM (Fast)	1000 1700
VHTR	▲	▲ ▲ ▲	Once Thru	600 MWth



# Supercritical-Water-Cooled Reactor

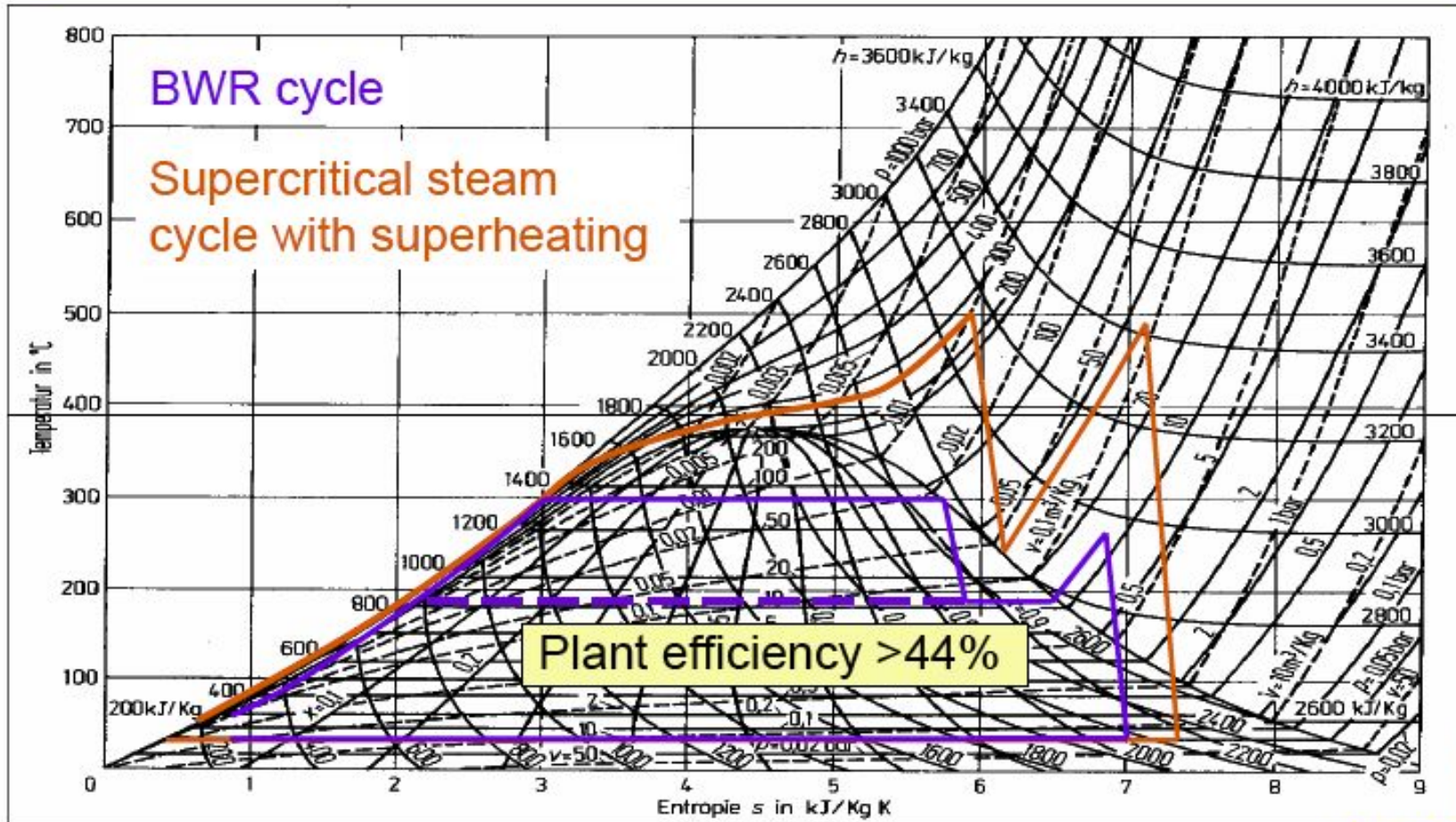


# Что дает переход на СКП?

- реакторы СКД позволят увеличить КПД одноконтурной установки до ~ 44%;
- сокращение необходимого количества теплоносителя в активной зоне (~ в 7-8 раз по сравнению с ВВЭР такой же мощности) позволяет сократить габариты агрегатов – насосов, турбин, трубопроводов и др., размеров контейнмента;
- простая тепловая схема (пар из реактора непосредственно идет на турбину), исключение большого количества дорогостоящего оборудования (парогенераторы, насосы, трубопроводы, арматура второго контура) приводит к снижению металлоемкости на ~ 60 %;
- высокие параметры пара (давление ~ 25 МПа и температура до 535÷545 °С);
- отсутствие такого явления как кризис теплообмена, т.к. нет второй фазы теплоносителя в реакторе, т.е. при нормальных условиях можно осуществить непрерывные режимы теплообмена;



# Cycle Efficiency



J. Starflinger, HPLWR Information Exchange Meeting, Cadarache, Sept. 4, 2007

