

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ОДНОФАЗНЫХ СРЕДАХ

(продолжение 4)

Свободная (естественная) конвекция



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

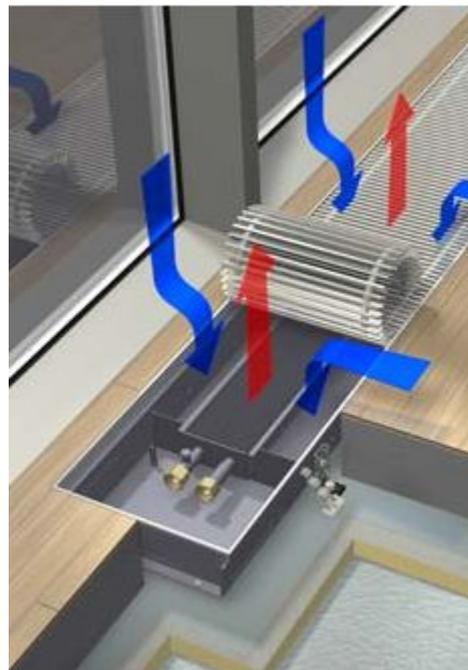
Пример:

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

Свободная конвекция

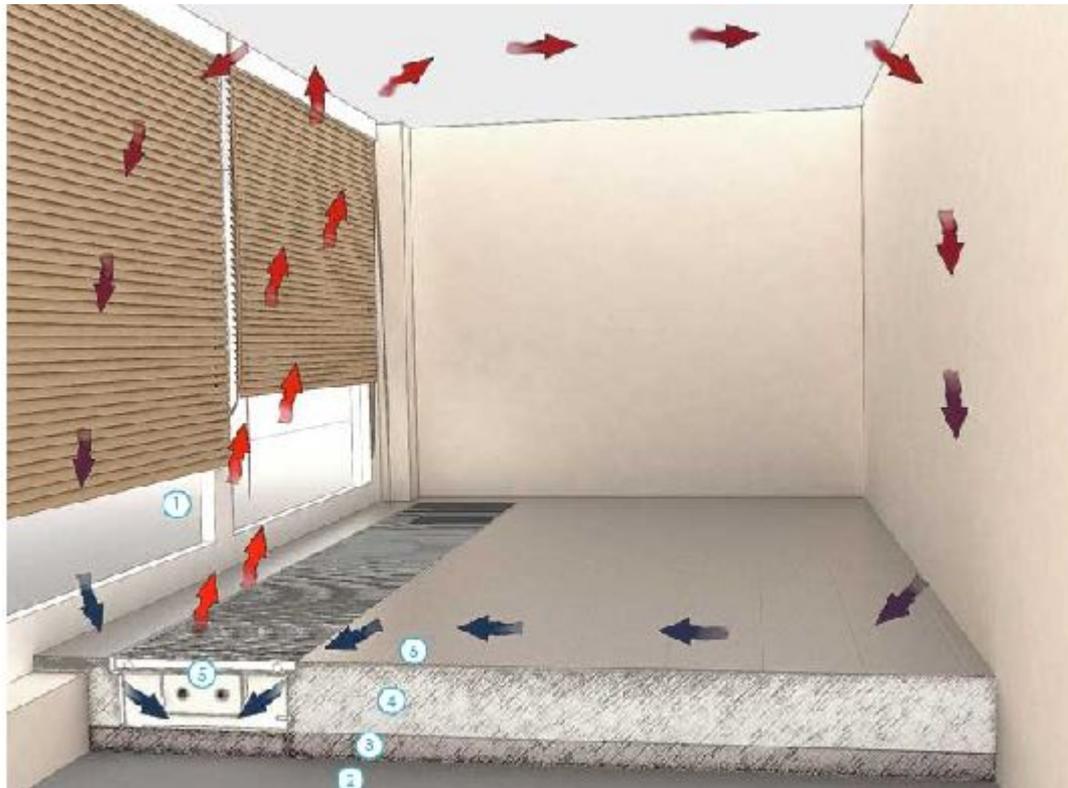


масляный радиатор



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

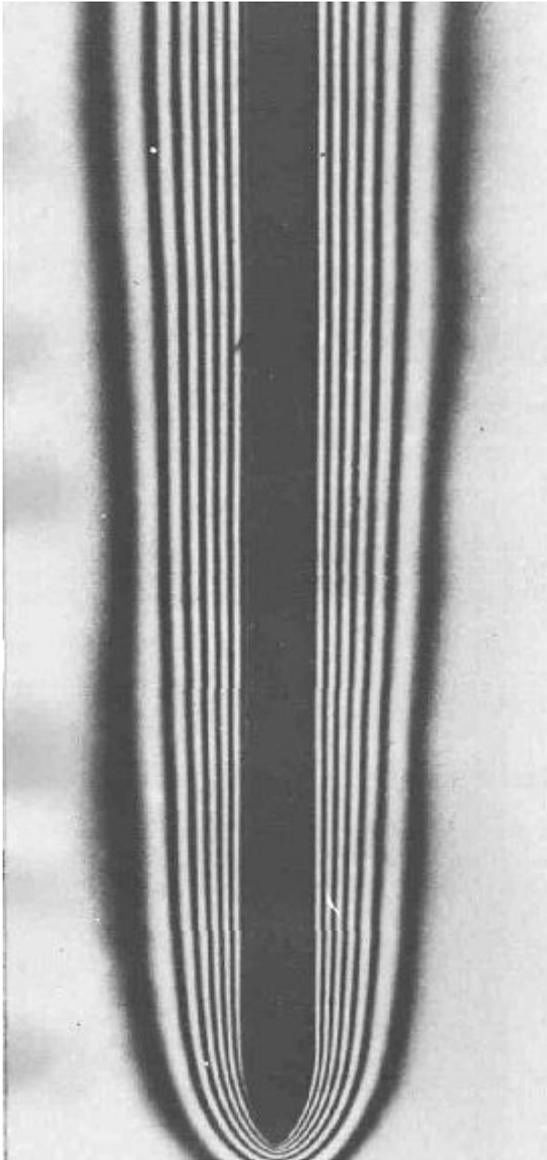
$$\rho W^2 \approx g \cdot \Delta\rho \cdot l$$

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



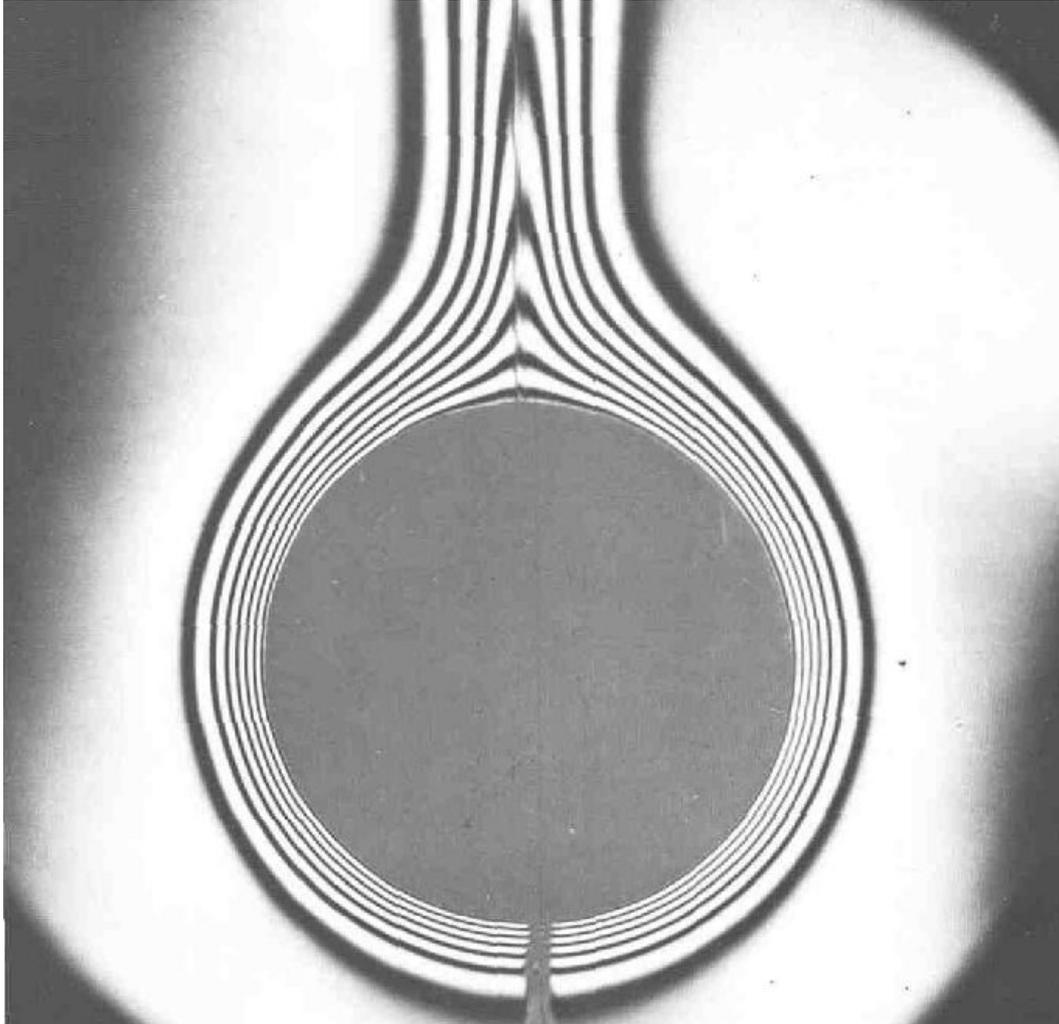
равномерно нагретая пластина в воздухе

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

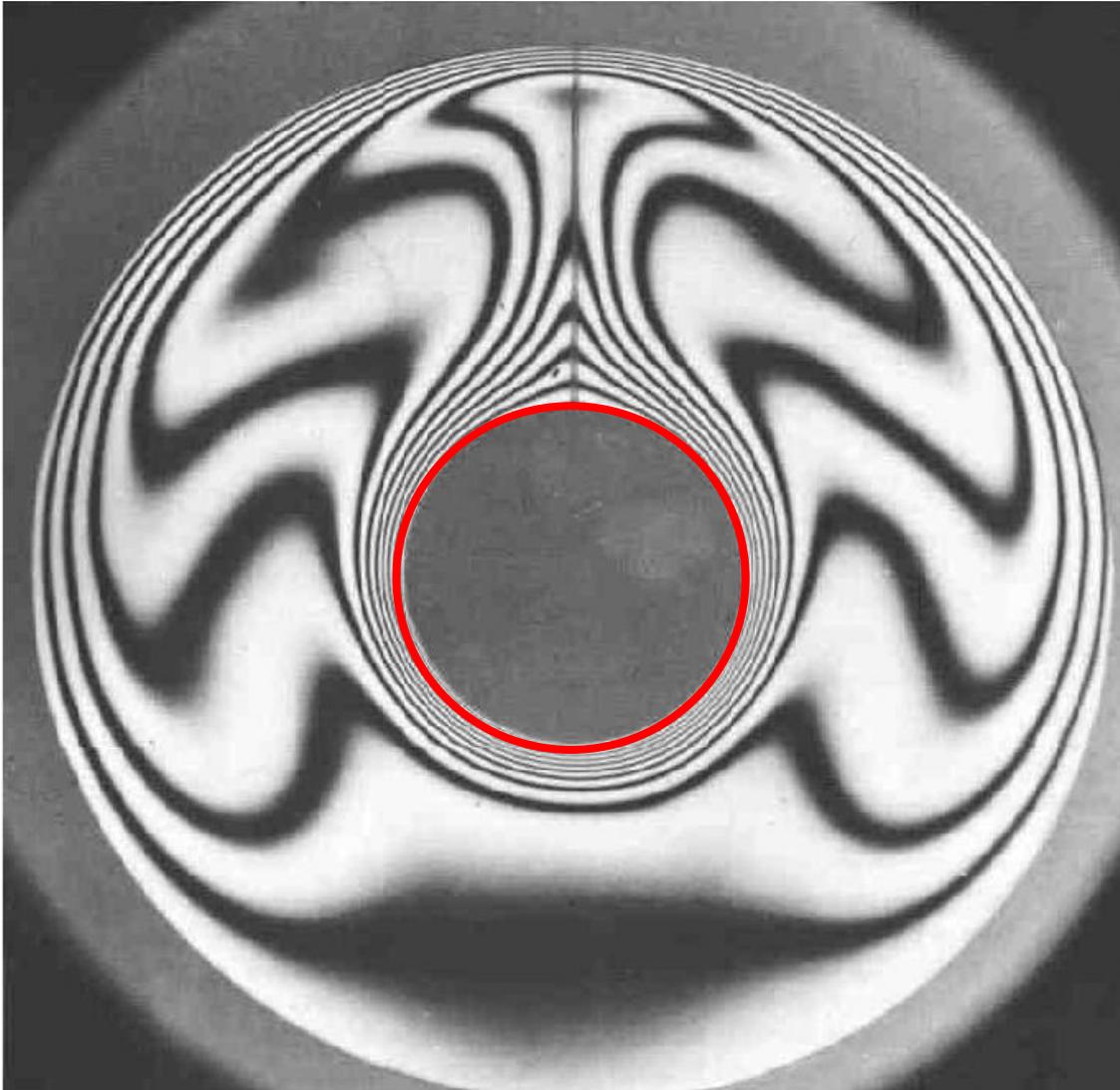


Равномерно нагретый
цилиндр

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

тепловые пограничные
слои сливаются вверху и
создают стационарный
ламинарный факел

Свободная конвекция



конвективное движение
между соосными
цилиндрами

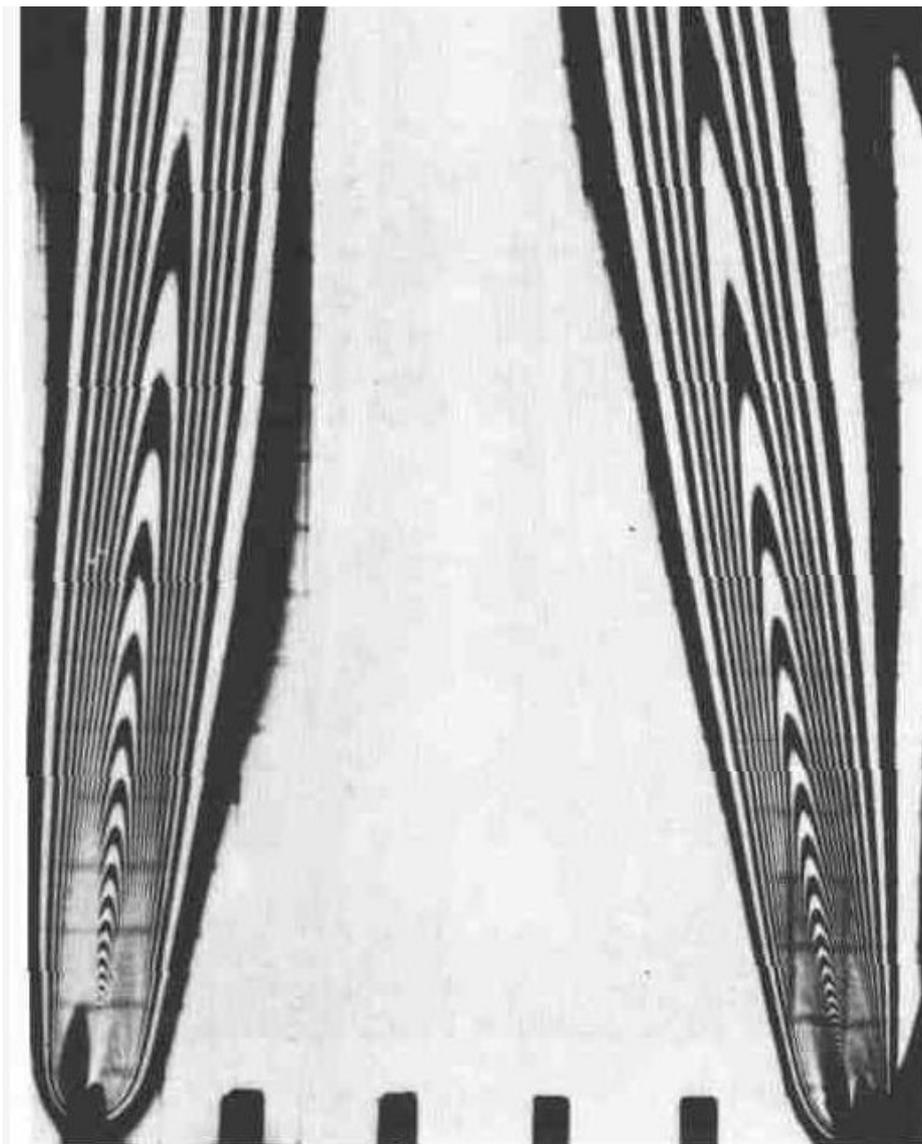
$$D_1/D_2=3$$

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

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

застойная зона под
внутренним
цилиндром

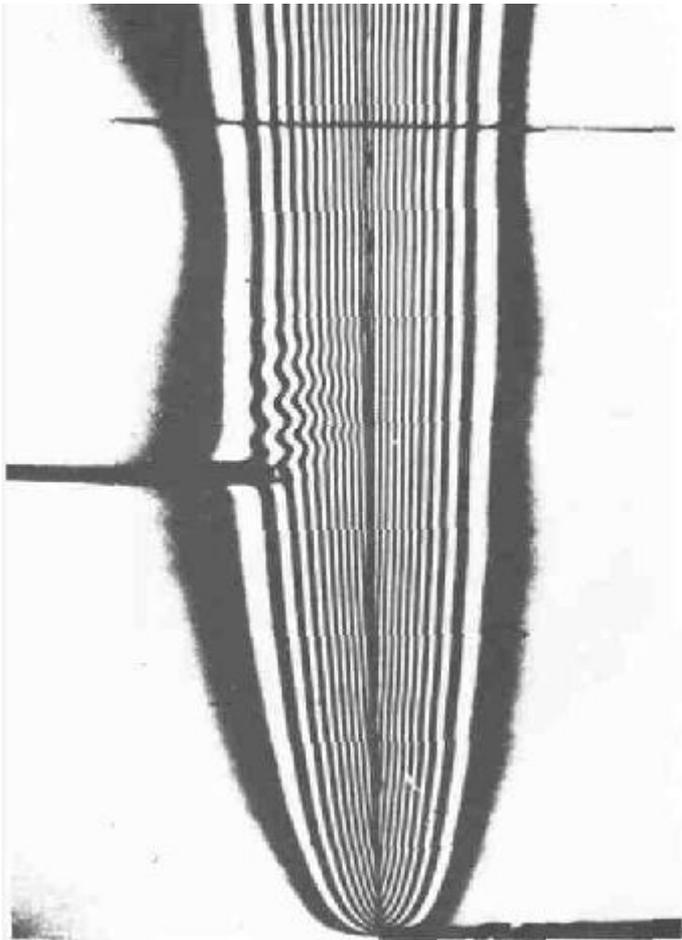
Свободная конвекция



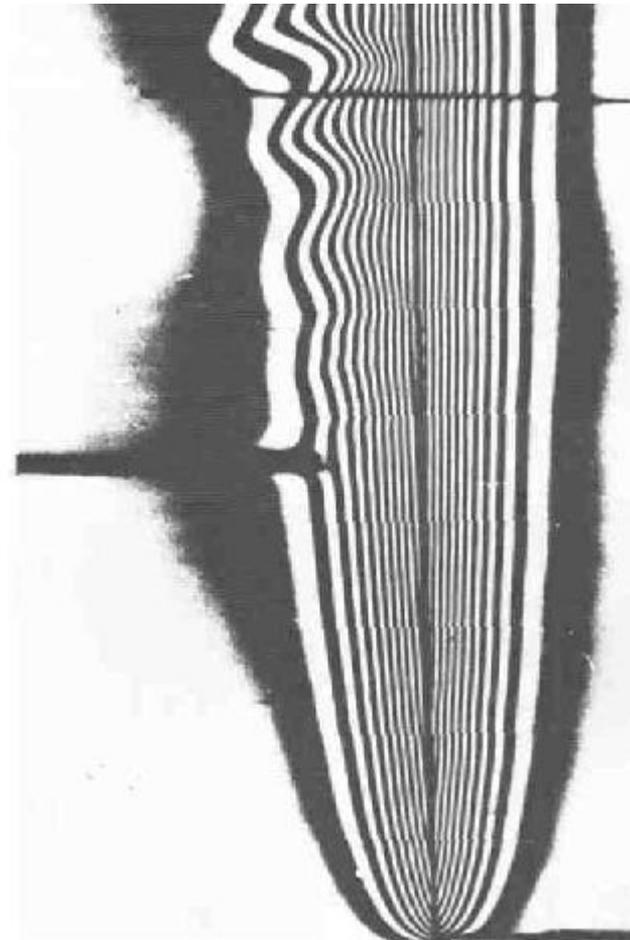
Взаимодействие двух
одинаковых
ламинарных факелов

Свободная конвекция

Неустойчивость конвекции от вертикальной пластины

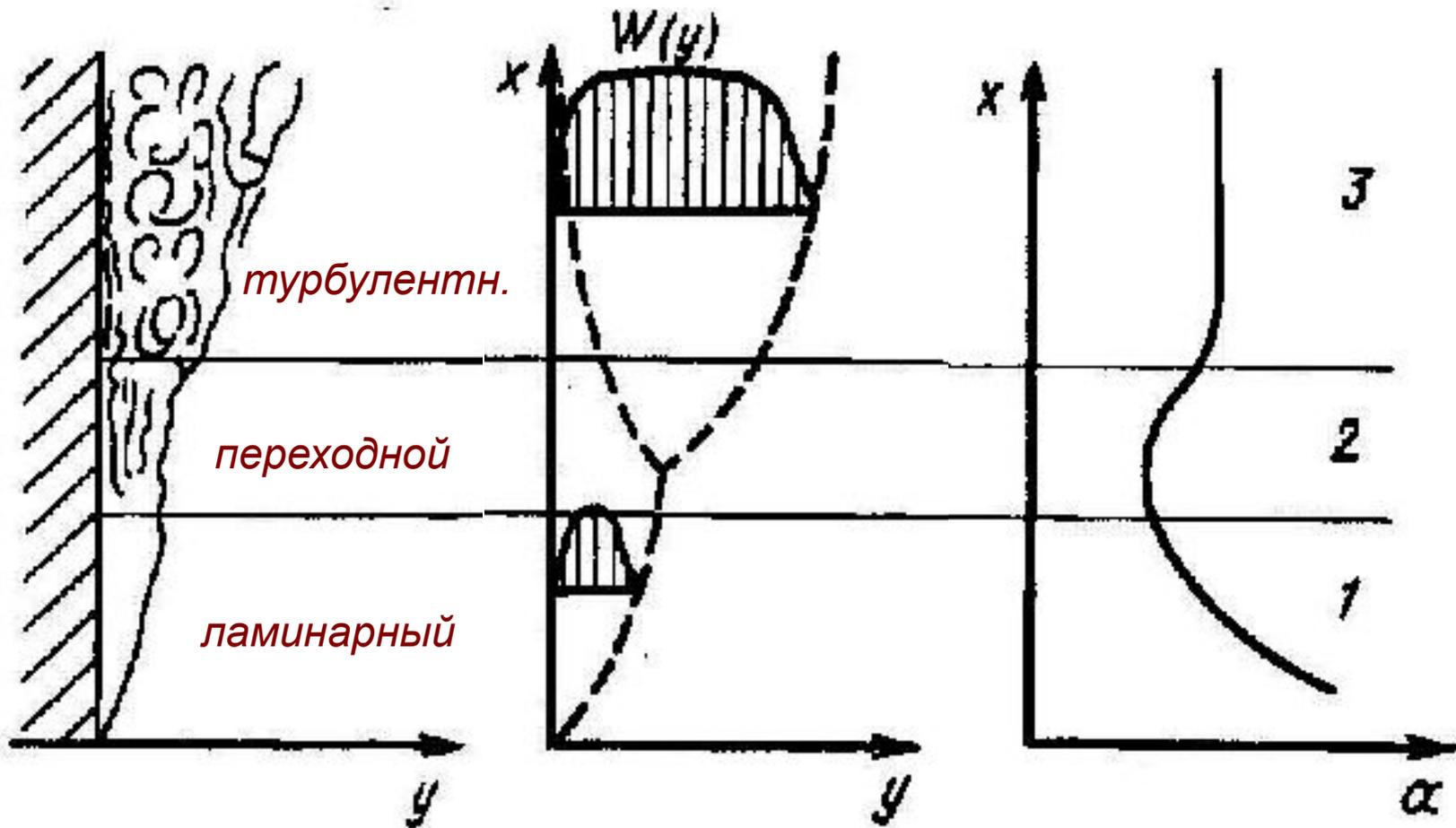


возмущения затухают при частоте 11,5 Гц



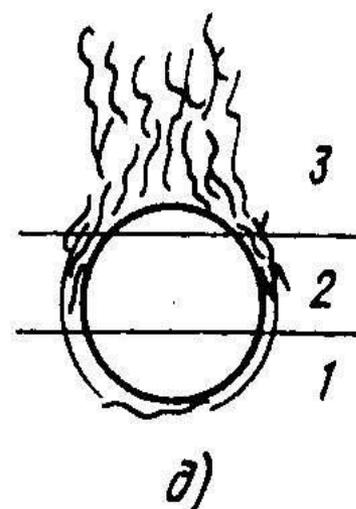
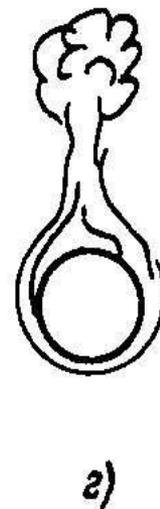
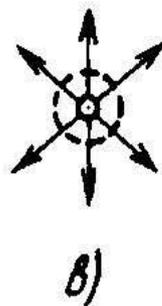
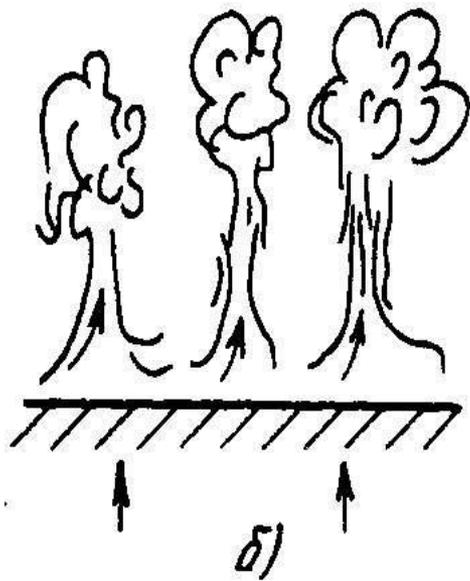
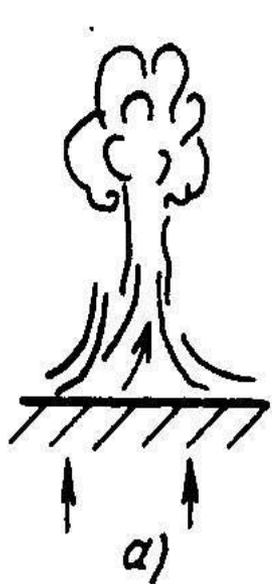
усиливаются при частоте 11,5 Гц

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

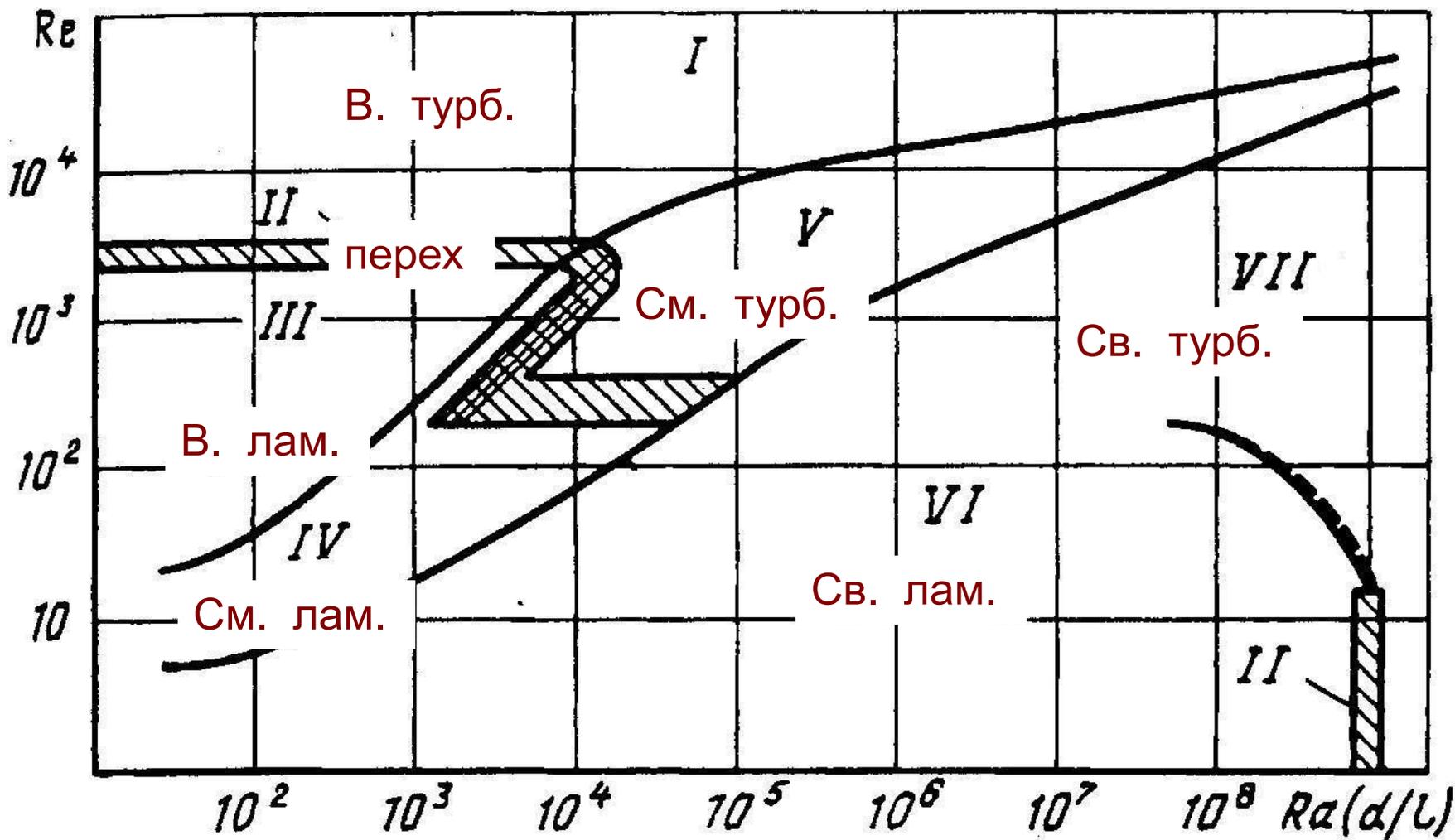
- 1) *параллельная* - совпадение направлений вынужденного и свободного движения;
- 2) *встречная* - противонаправленное движение свободной и вынужденной конвекции;
- 3) *винтовое движение* - на вынужденное течение в горизонтальном направлении накладывается свободное движение, направленное перпендикулярно.

вынужденное течение - Re

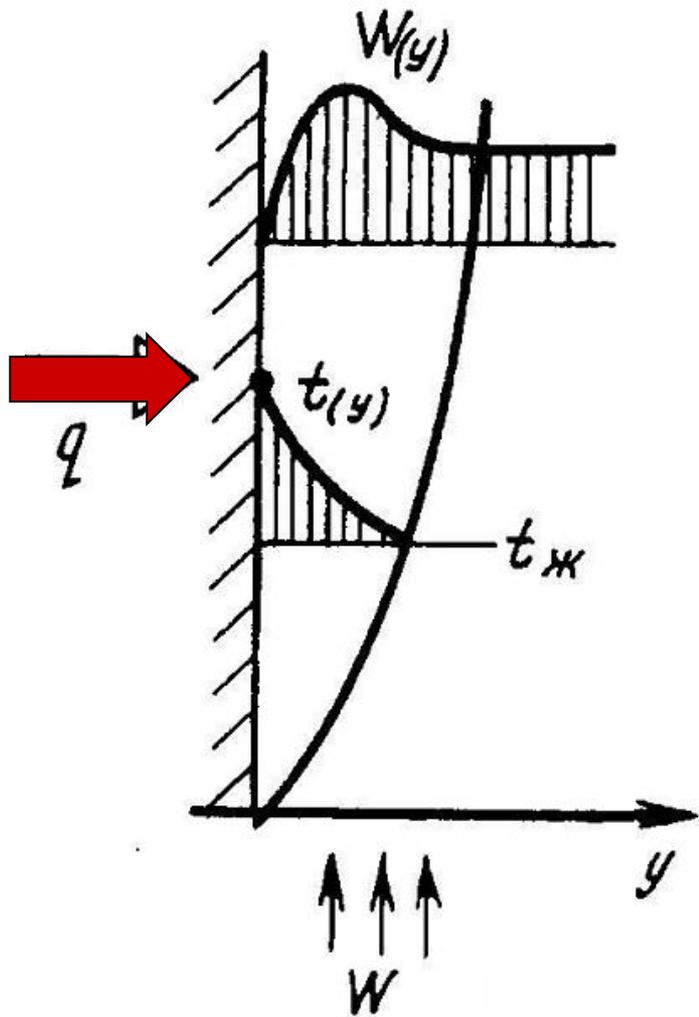
свободное течение - $Ra = Gr \cdot Pr$ число Рэлея

Границы свободной, вынужденной и смешанной конвекции

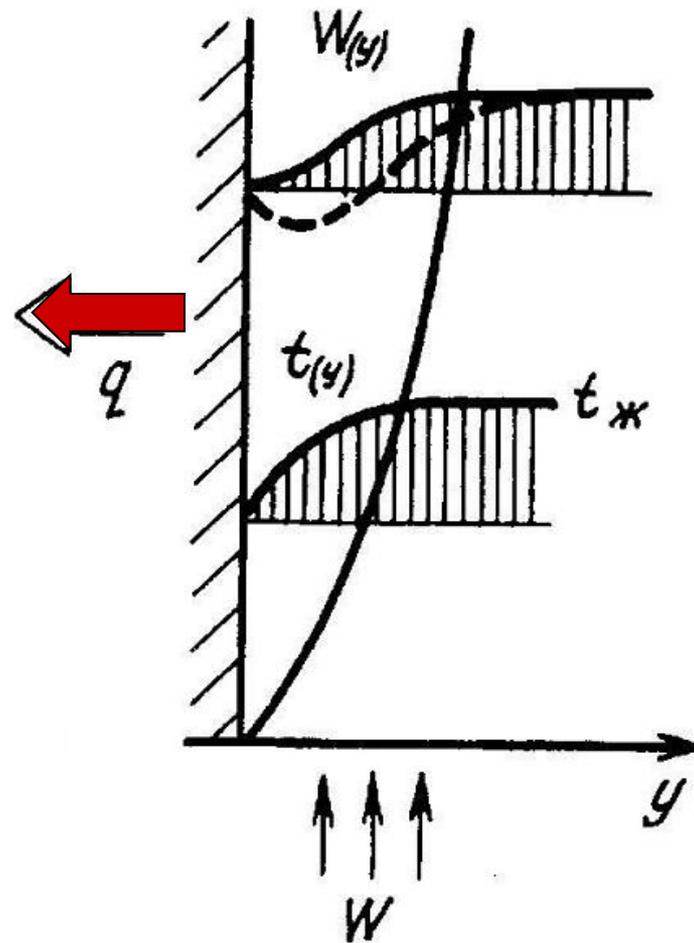
$$Re = \text{fun}[Gr \cdot Pr \cdot (d/l)]$$



Смешанная конвекция около вертикальной пластины



параллельная



встречная

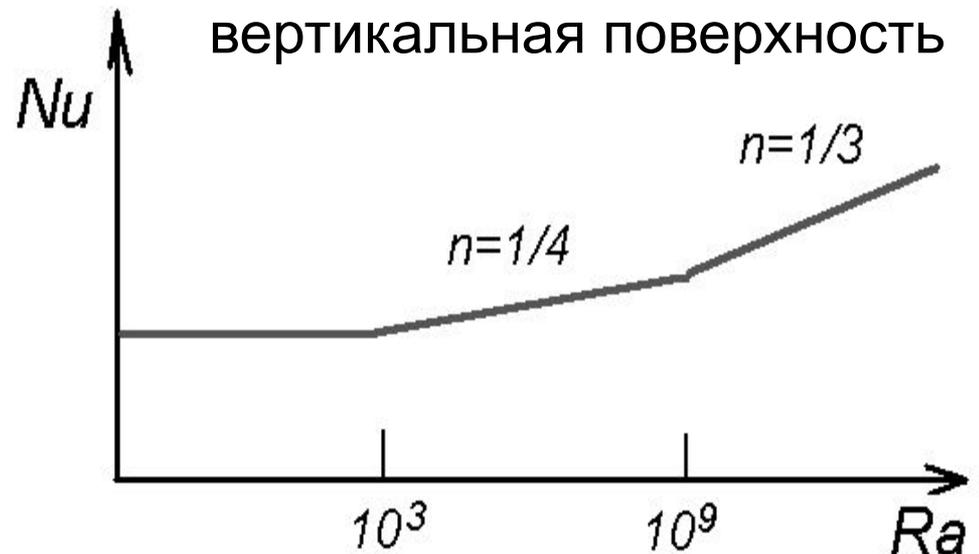
Расчетные формулы

$$Pr \geq 1$$

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

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

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 θ к вертикали
вертикальное положение $\theta = 0$

используется число Релея Ra_{θ}

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

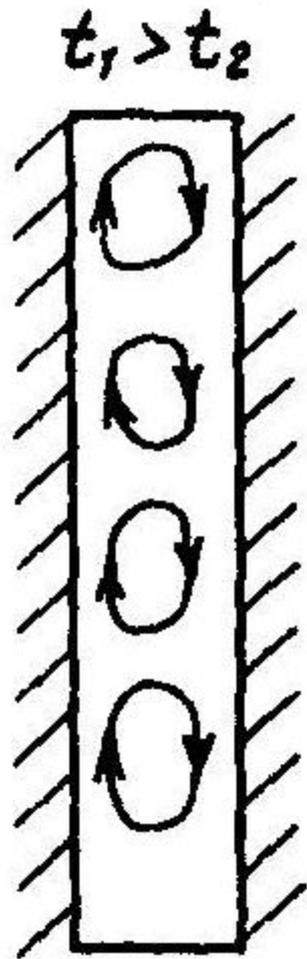
$$Nu = 0,348 Ra_{\theta}^{1/4}$$

**для
воздуха**

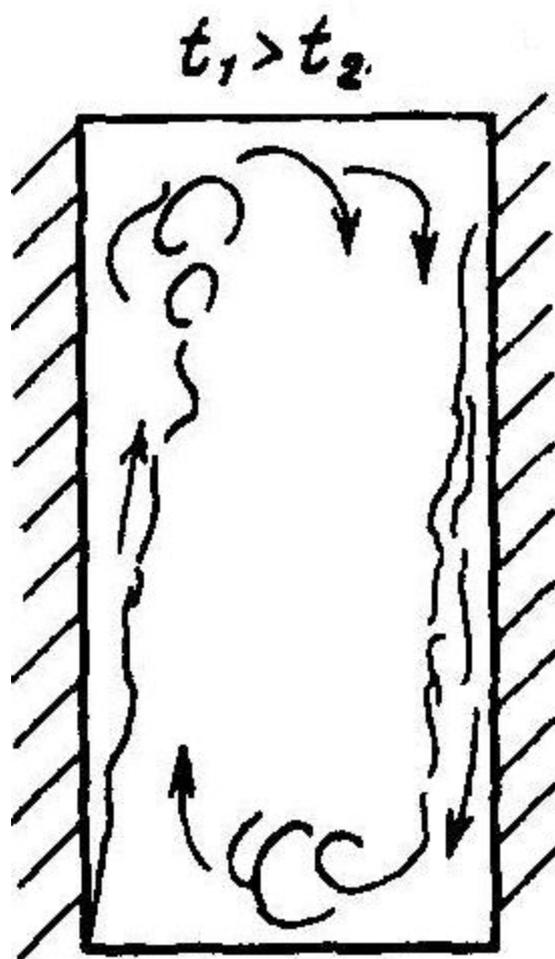
$$Nu = 0,56 Ra_{\theta}^{1/4}$$

для воды

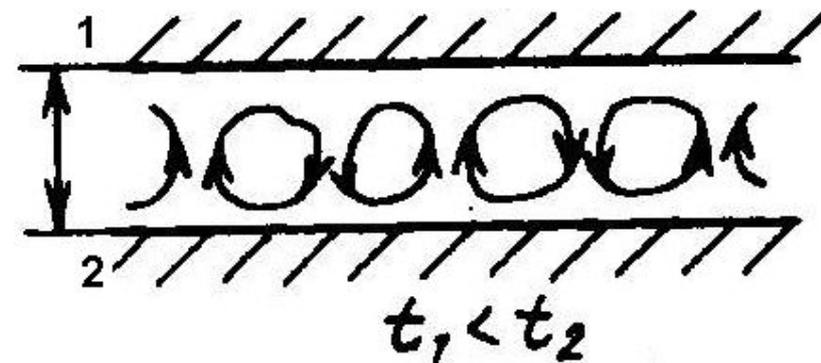
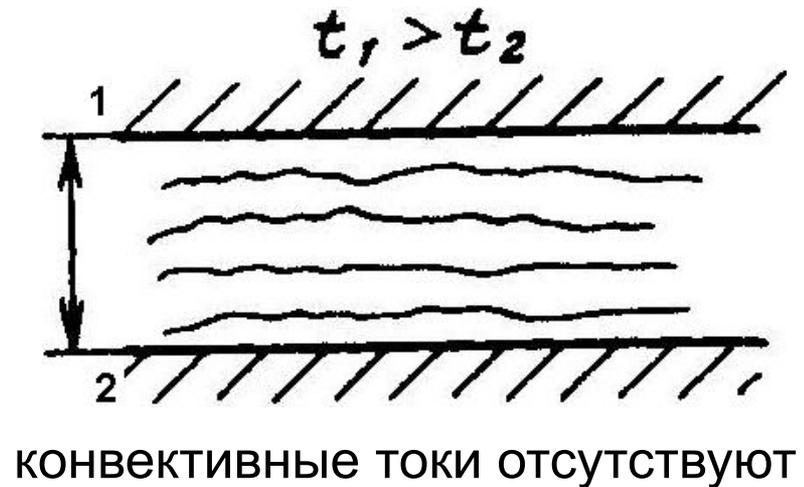
Свободное движение жидкости в ограниченном пространстве



отдельные
ячейки



течение по
всему объему



ячейки Бенара

Свободное движение жидкости в ограниченном

пространстве

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

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

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

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

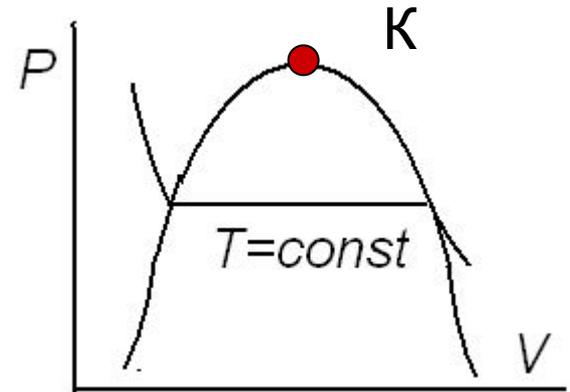
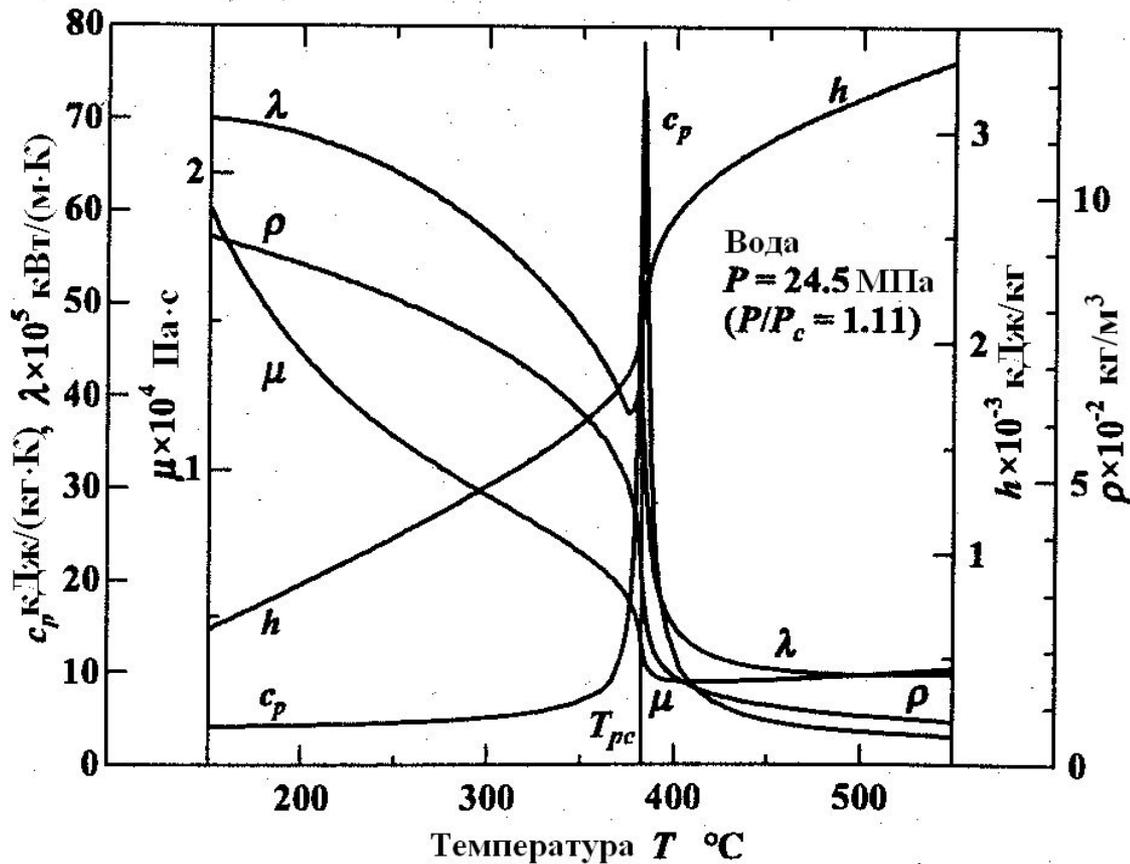
определяющий размер – толщина слоя δ

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

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

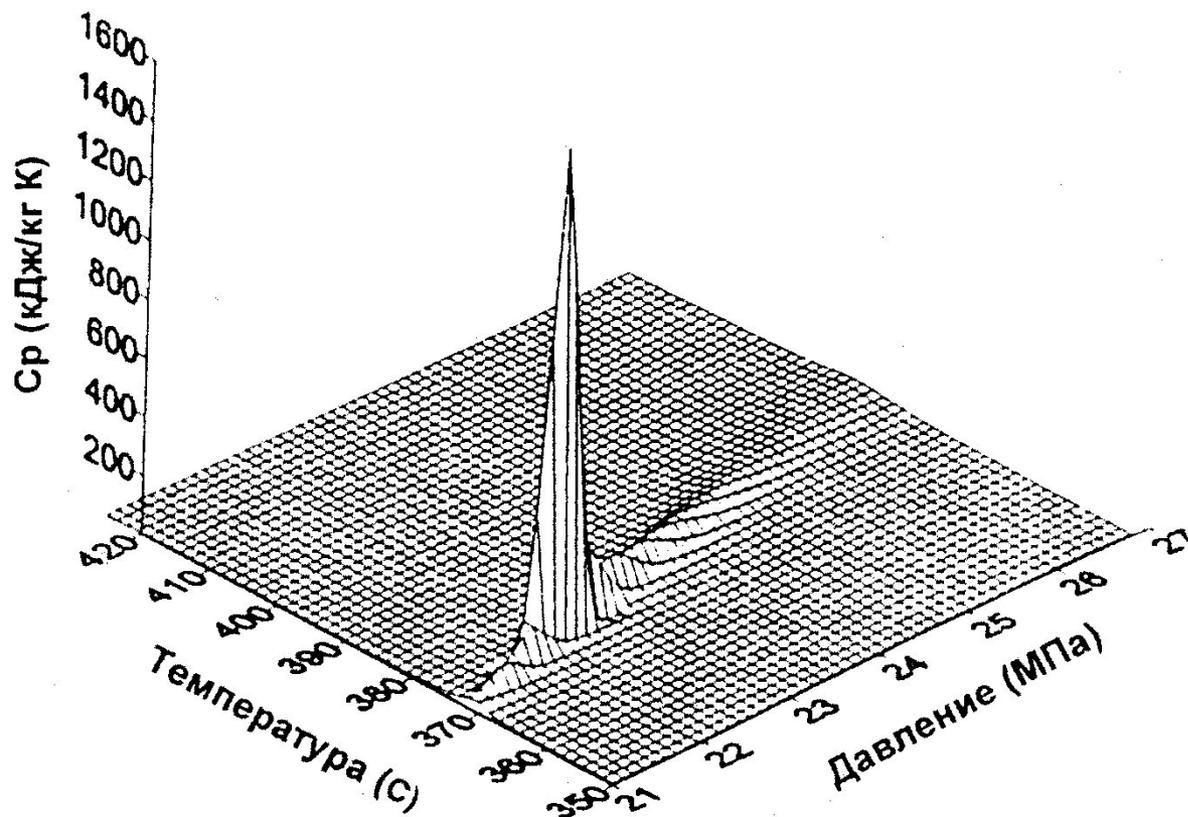
Теплообмен в околокритической области

сильное изменение свойств в зависимости от температуры



t_m – псевдокритическая температура

Изменение свойств воды при СКД



Теплоемкость воды

Теплообмен в околокритической области

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

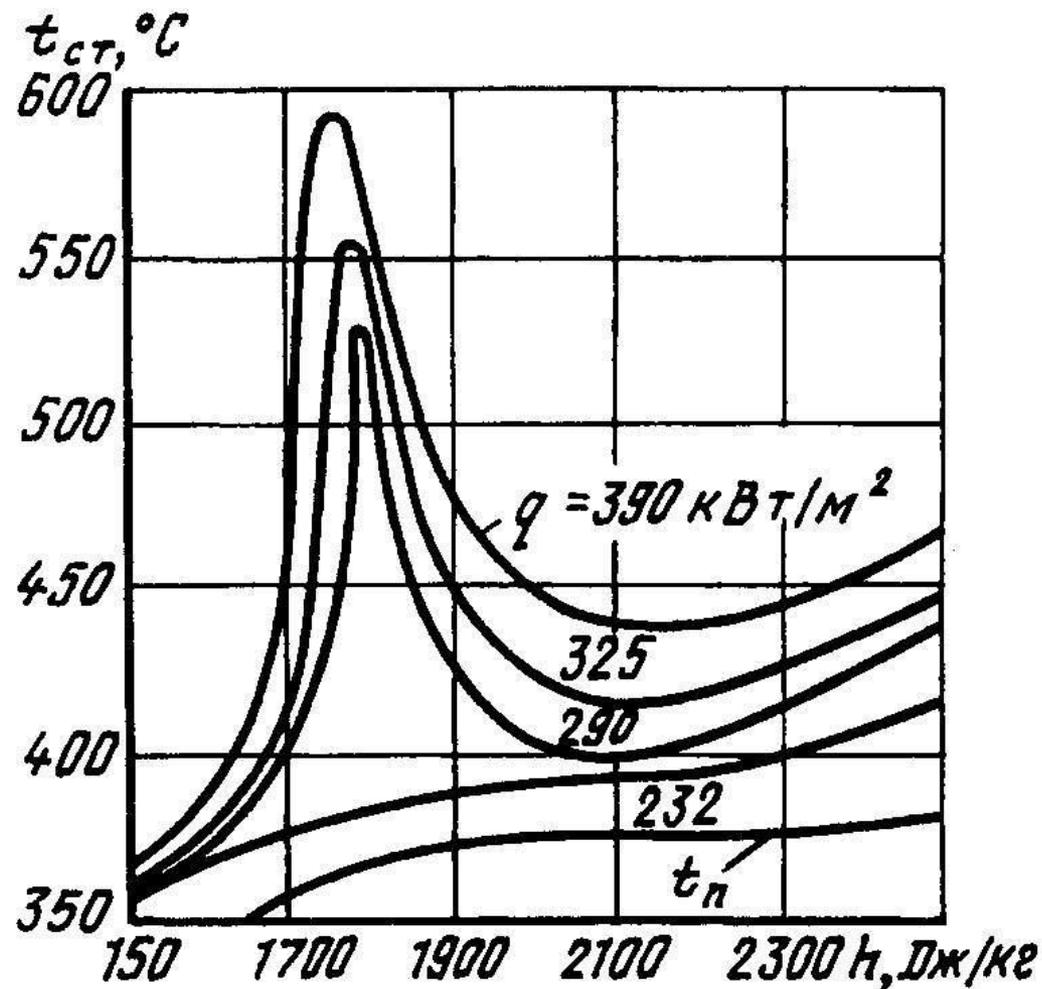
$$Nu = Nu_o \left(\frac{\overline{c_p}}{c_p} \right)^n \cdot \left(\frac{\rho_{см}}{\rho} \right)^m \cdot \varphi(K)$$

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

- 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

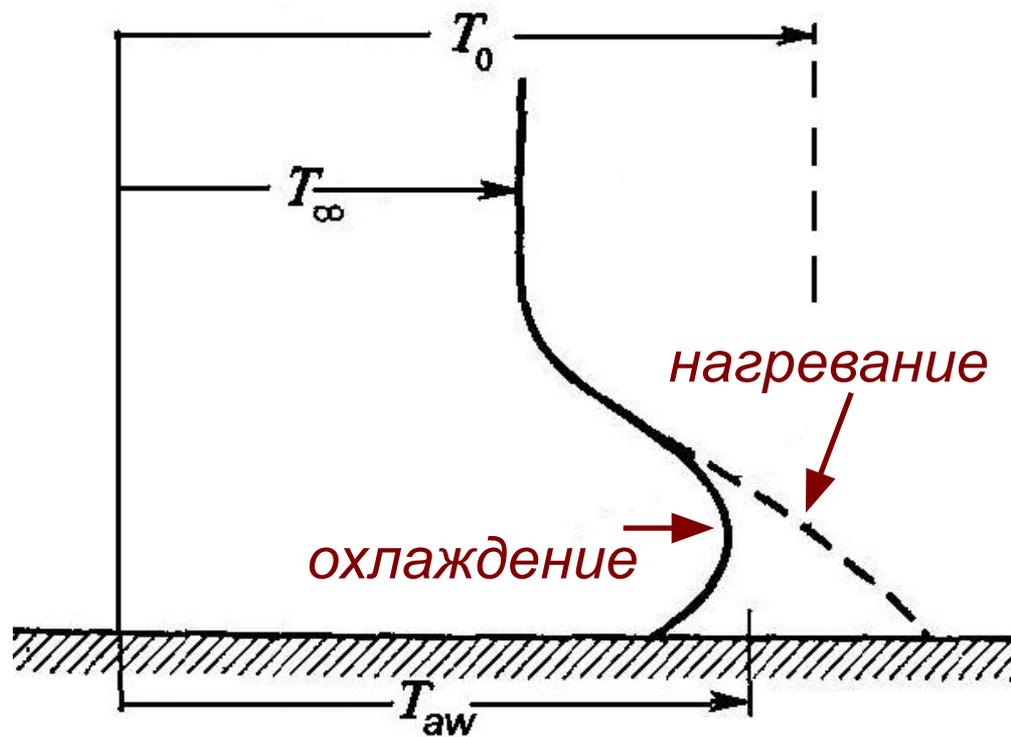
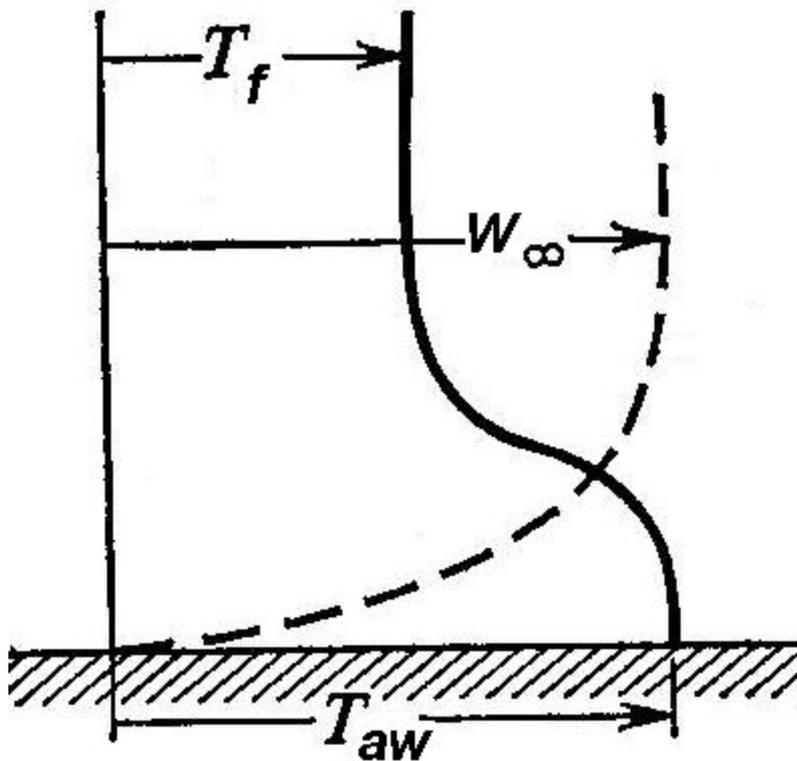
Перенос газа при высоких скоростях

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_t – теплосодержание газа после торможения, $W_t=0$ (газ заторможен).

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

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

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

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 Δm , имеющая температуру ϑ 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

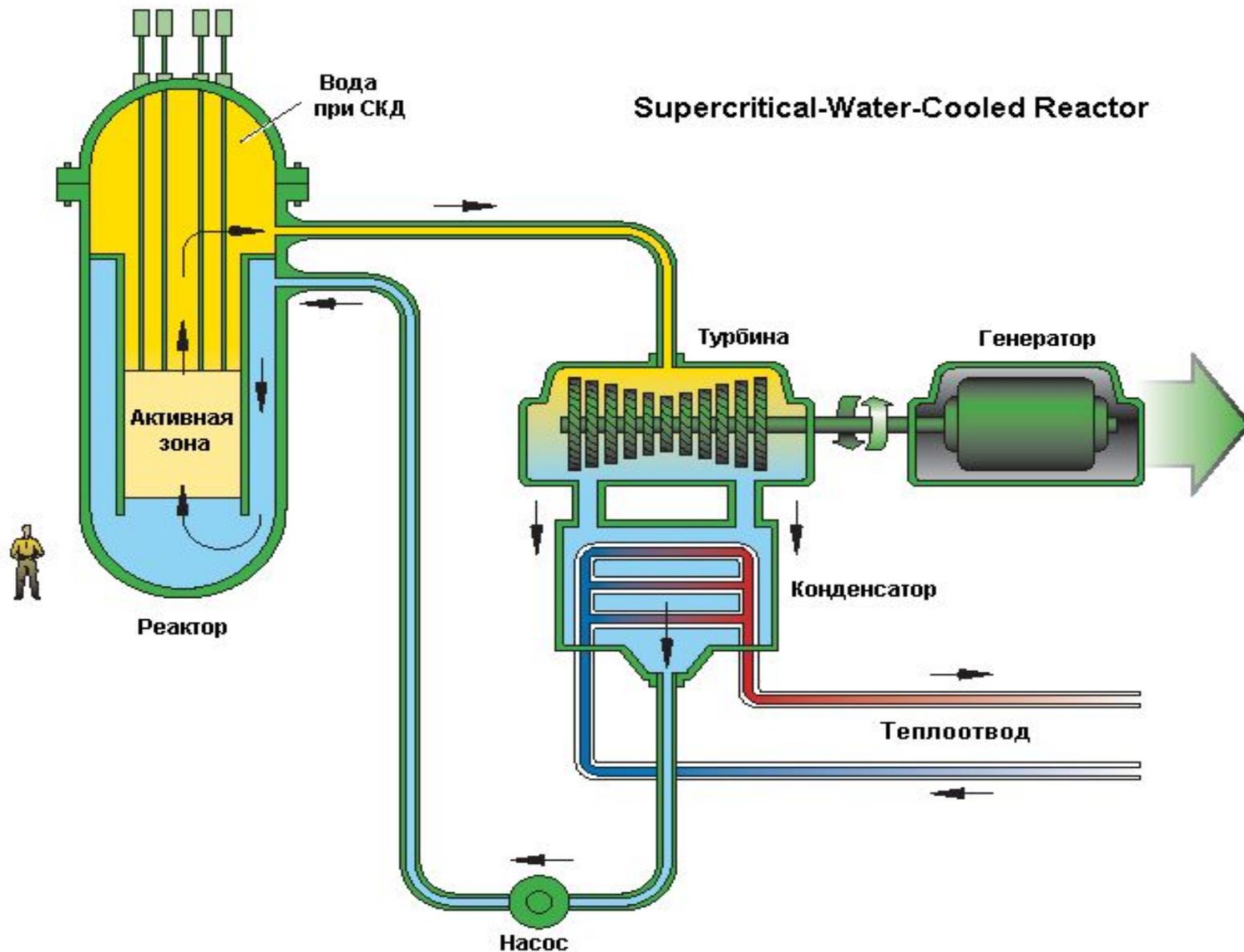
Gen IV Systems	Neutron Spectrum	Coolant	Fuel	Recycle Process	Outlet Temp.
GFR	Fast	Gas	Carbide	Aqueous (or Pyro)	850°C
LFR	Fast	Pb or Pb/Bi	Metal/ Nitride	Pyro	550-800°C
MSR	Thermal	Salt	Fluoride	Salt process	700°C
SFR	Fast	Na	Metal/ MOX	Pyro/ Aqueous	520-500°C
SCWR	Thermal/ Fast	Supercritical water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

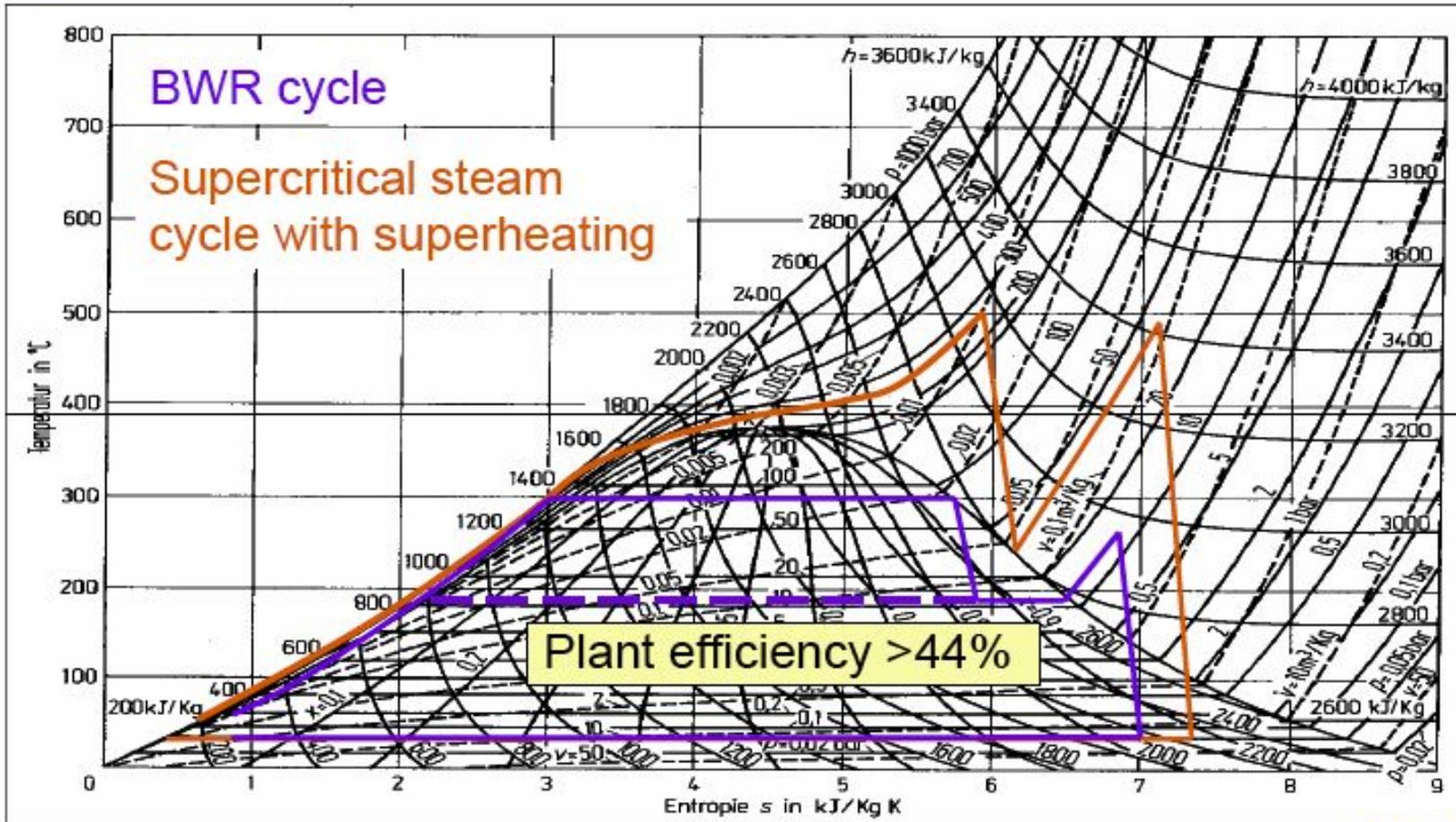
Supercritical-Water-Cooled Reactor



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

