

自然对流的无量纲动量方程

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{Gr}{Re^2} T^* + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$Gr = \frac{g \alpha_v \Delta T l^3}{\nu^2}$$

浮升力与粘滞力的相对大小

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \alpha_v \Delta T l^3}{\cancel{\nu^2}} \frac{\cancel{\nu^2}}{u_0^2 l^2}$$

均匀壁温下的大空间自然对流

$$Nu_m = C(Gr Pr)_m^n$$

1. 注：C,n受加热表面形状，流动状态，Gr数大小的影响 pp.269 表6-10
2. 湍流时，表面传热系数与特征长度无关。自模化特征

有相变化的对流传热

有相变对流传热的特点

① 相变过程中产生大量相变热（潜热）；

例：水

100°C 时，汽化潜热 $r = 2258.4\text{kJ} / \text{kg}$

$0-100^{\circ}\text{C}$ ，比热 $C_p = 4.187\text{kJ} / \text{kg}^{\circ}\text{C}$

$$h_{\text{phase change}} \gg h_{\text{no phase change}}$$

② 相变过程有其特殊传热规律，传热更为复杂；

③ 分为蒸汽冷凝与液体沸腾两种情况。

●蒸汽冷凝机理

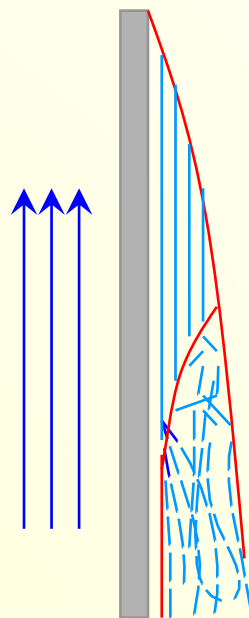
优点：饱和蒸汽具有恒定的温度，操作时易于控制，
蒸汽冷凝的表面传热系数较大。

冷凝方式：

① 膜状冷凝

凝液呈液膜状（附着力大于表面张力），

热量：蒸汽相→液膜表面→固体壁面。

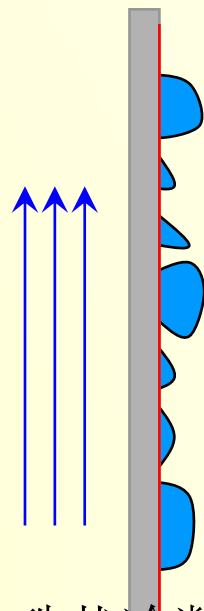


膜状冷凝

② 珠状冷凝

凝液结为小液滴（附着力小于表面张力），

有裸露壁面，直接传递相变热。



珠状冷凝

比较两种冷凝方式的表面传热系数

$h_{\text{滴状冷凝}} > h_{\text{膜状冷凝}}$ ，相差几倍到几十倍，

但工业操作上，多为膜状冷凝。

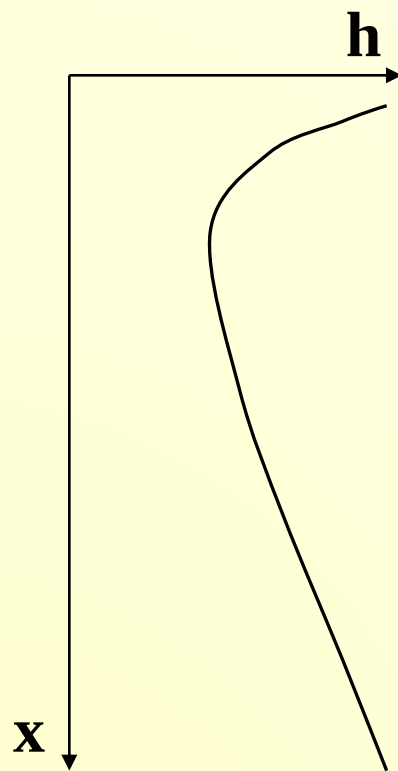
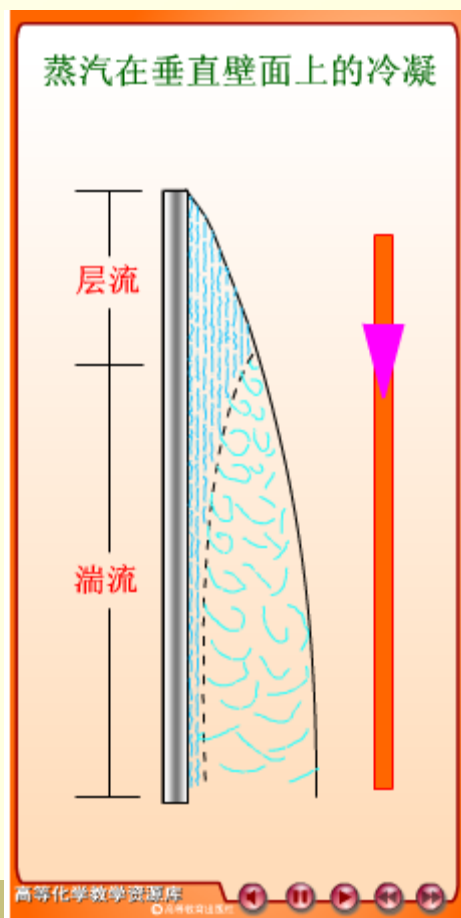
(2) 膜状冷凝表面传热系数

① 努塞尔方程的理论推导

研究：垂直管外或壁面的膜状冷凝；

方法：真实模型→简化模型→数学模型求解。

◆ 膜状冷凝的真实过程



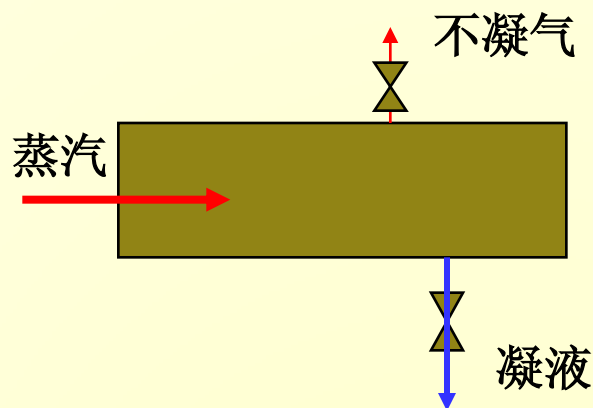
膜状凝结的努
塞尔理论解：

$$h = 0.943 \left(\frac{\rho_l^2 g \lambda_l^3}{\mu_l l} \frac{h_{fg}}{(T_s - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

●水平管内冷凝

特点：考虑蒸汽流速对 h 的影响

- (1) 蒸汽流速不大时，凝液可顺利排出，可采用管外冷凝公式计算。
- (2) 当蒸汽速度较大时，可能形成两相流动，应参考有关公式。



● 影响冷凝传热的因素

◇ 冷凝液膜两侧的温度差：

◇ 流体物性的影响： ρ 、 η 、 λ 、 r 均影响 h

◇ 不凝性气体的影响：形成气膜，表面传热系数大幅度下降。

◇ 蒸气过热的影响：过热蒸汽，若壁温高于饱和温度，传热过程与无相变对流传热相同；若壁温低于饱和温度，按饱和蒸汽冷凝处理。

◇ 蒸气流速的影响：流速不大时，影响可忽略；

流速较大时，且与液膜同向， h 增大；

流速较大时，且与液膜反向， h 减小。

(5) 液体沸腾传热

沸腾： 沸腾时，液体内部有气泡产生，
气泡产生和运动情况，对 h 影响极大。

沸腾分类：

① 按设备尺寸和形状不同

池式沸腾（大容积饱和沸腾）；

强制对流沸腾（有复杂的两相流）。

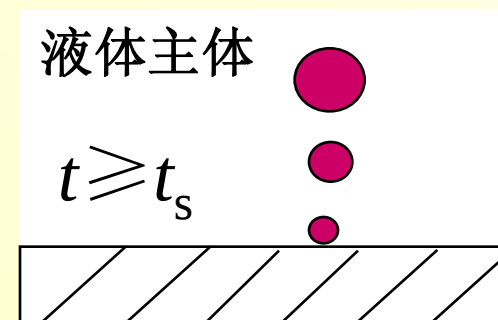
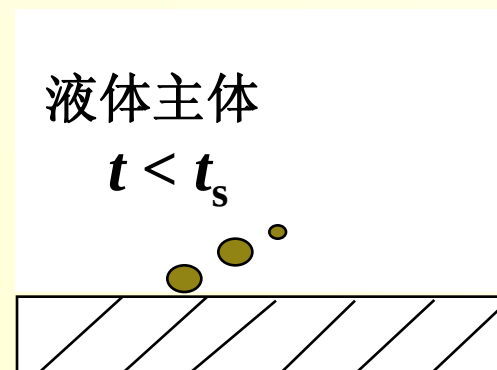
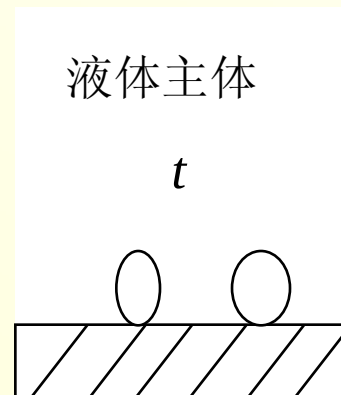
② 按液体主体温度不同

过冷沸腾： 液体主体温度 $t < t_s$ ，

气泡进入液体主体后冷凝。

饱和沸腾： $t \geq t_s$ ，

气泡进入液体主体后不会冷凝。

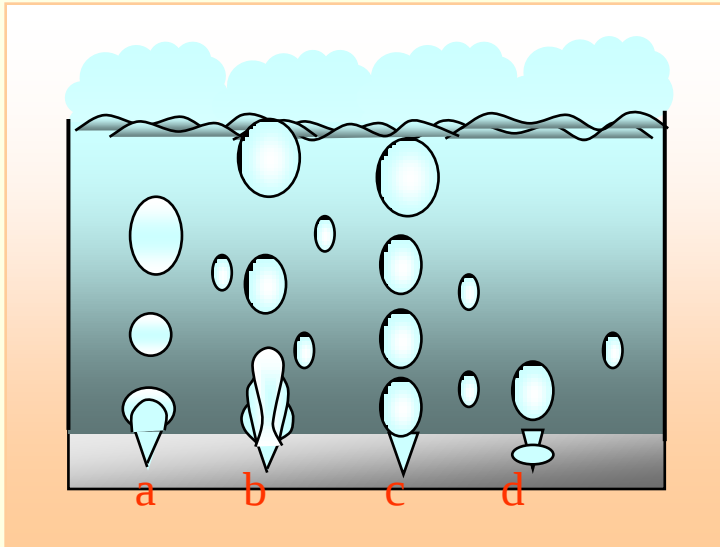


1) 大容积饱和沸腾传热机理

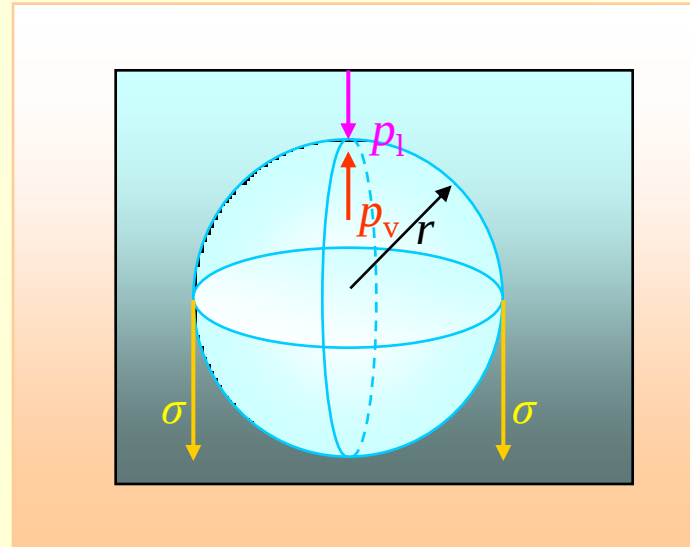
a) 汽泡能够存在的条件:

$$\pi r^2 (p_v - p_l) = 2\pi r \sigma$$

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r}$$



气泡的生成过程



气泡的力平衡

b) 汽泡产生的条件

◇ 液体必须过热

提供必须的汽化热量

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r}$$

◇ 必须有汽化核心

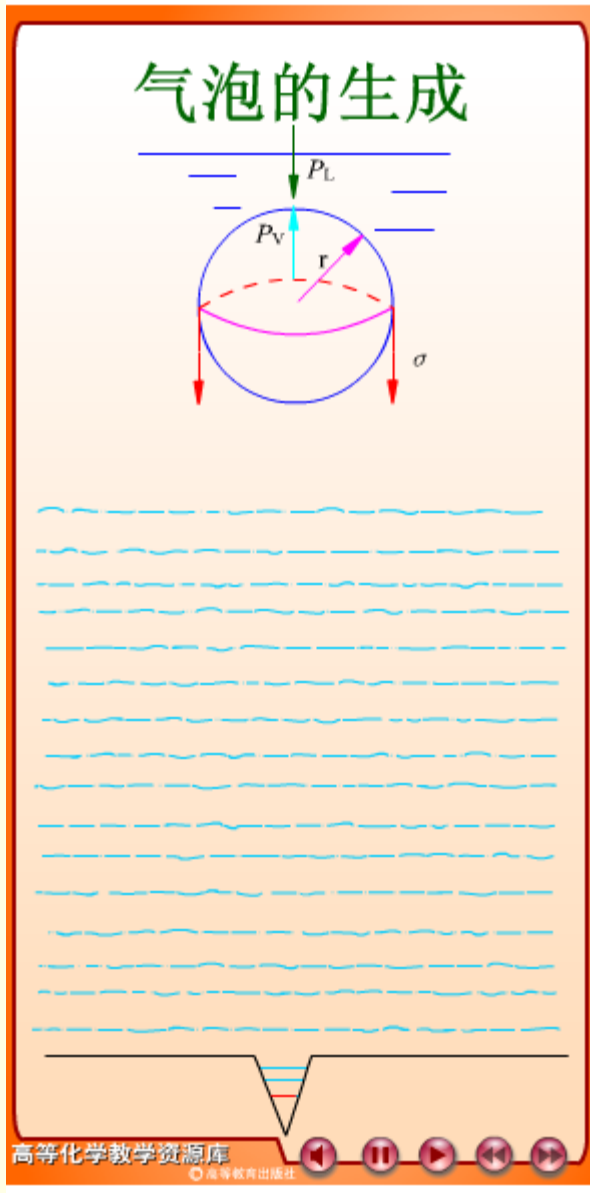
当 $r \rightarrow 0$ 时, 要求 $p_v - p_l \rightarrow \infty$

汽化核心: 体积很小的孔穴或固体颗粒,

气泡能附着在其周围生长。

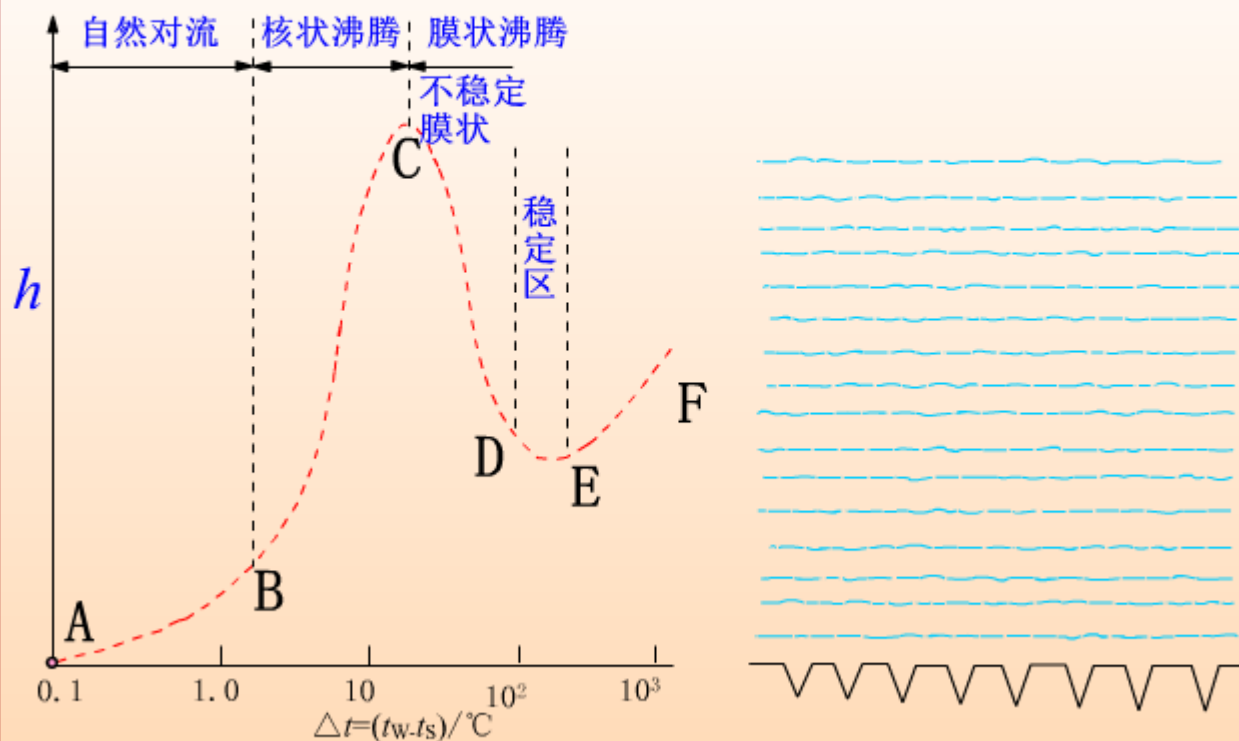
说明:

- 因此无汽化核心, 气泡不会产生;
- 液体过热度增大, 汽化核心数增多。



气泡的产生过程

气泡的产生过程



沸腾过程:

$t < t_s$ 时: 无气泡产生, 热量传递: 加热面 $\xrightarrow{\text{自然对流}}$ 液体

$t \geq t_s$ 时: 气泡首先在汽化核心上产生, 长大后凭浮力进入液体。

过热度 $\uparrow$, 汽化核心数 $\uparrow$, 气泡产生和长大的速度 $\uparrow$,
使沸腾加剧, 沸腾传热膜系数 $\uparrow$ 。

说明: 由于气泡产生, 使液体扰动 $\uparrow$

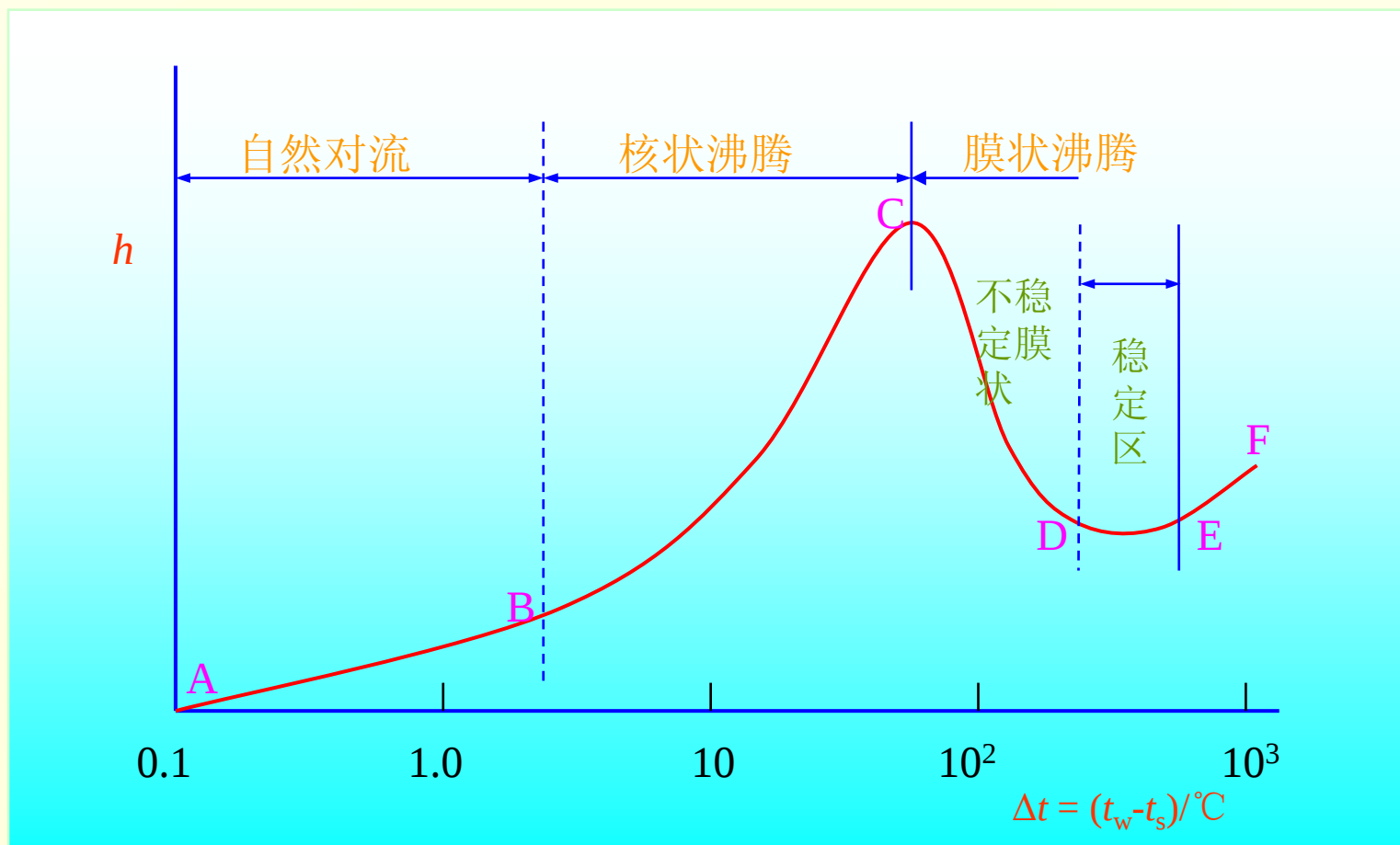
因此:

$$h_{\text{沸腾}} \gg h_{\text{自然对流}}$$

2) 大容积饱和沸腾曲线

曲线获得：实验，并以 $\Delta t - h$ 作图 （ $\Delta t = t_w - t_s$ ，即过热度）

实验条件：大容积、饱和沸腾。



沸腾温度差和表面传热系数关系

沸腾曲线意义:

AB段：无相变自然对流，无汽泡产生， h 缓慢增加

BC段：核状沸腾

一方面，随 $\Delta t \uparrow$ ，汽泡数 $\uparrow$ ，使 $h \uparrow \uparrow$ ；

另一方面，汽膜覆盖 $\uparrow$ ，又使 $h \downarrow$ ；

当两者作用相抵消，出现转折点—临界点（C点）。

临界值： Δt 、 q 、 Q

CD段：核状、膜状共存，膜覆盖为主， $\Delta t \uparrow$ ， $h \downarrow$ ；

DEF段：稳定膜状沸腾，全部膜覆盖， $\Delta t \uparrow$ ， $h \downarrow$ ；

而后辐射作用加强， $\Delta t \uparrow$ ， $h \uparrow$ 。

说明：工业上，应严格控制在核状沸腾区内操作。

大容器核态沸腾传热关联式

Rohsenow的关联式—与湍流自然对流进行类比

$$\frac{c_p \Delta T}{h_{fg}} = c_{wl} \left[\frac{q}{\mu h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{1/3} \text{Pr}_l^s$$

Zuber的最大临界热流密度

$$q_{\max} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left(\frac{\rho_v + \rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2}$$