

Х ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД
ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
МЕХАНИКИ

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В
СИСТЕМЕ КАПЕЛЬНАЯ
ПЕЛЕНА–КАПЛЕУЛОВИТЕЛЬ В УСЛОВИЯХ
ОТКРЫТОГО КОСМОСА**

Попушина Е.С.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
лаборатория многофазных сред

2011 год

Содержание

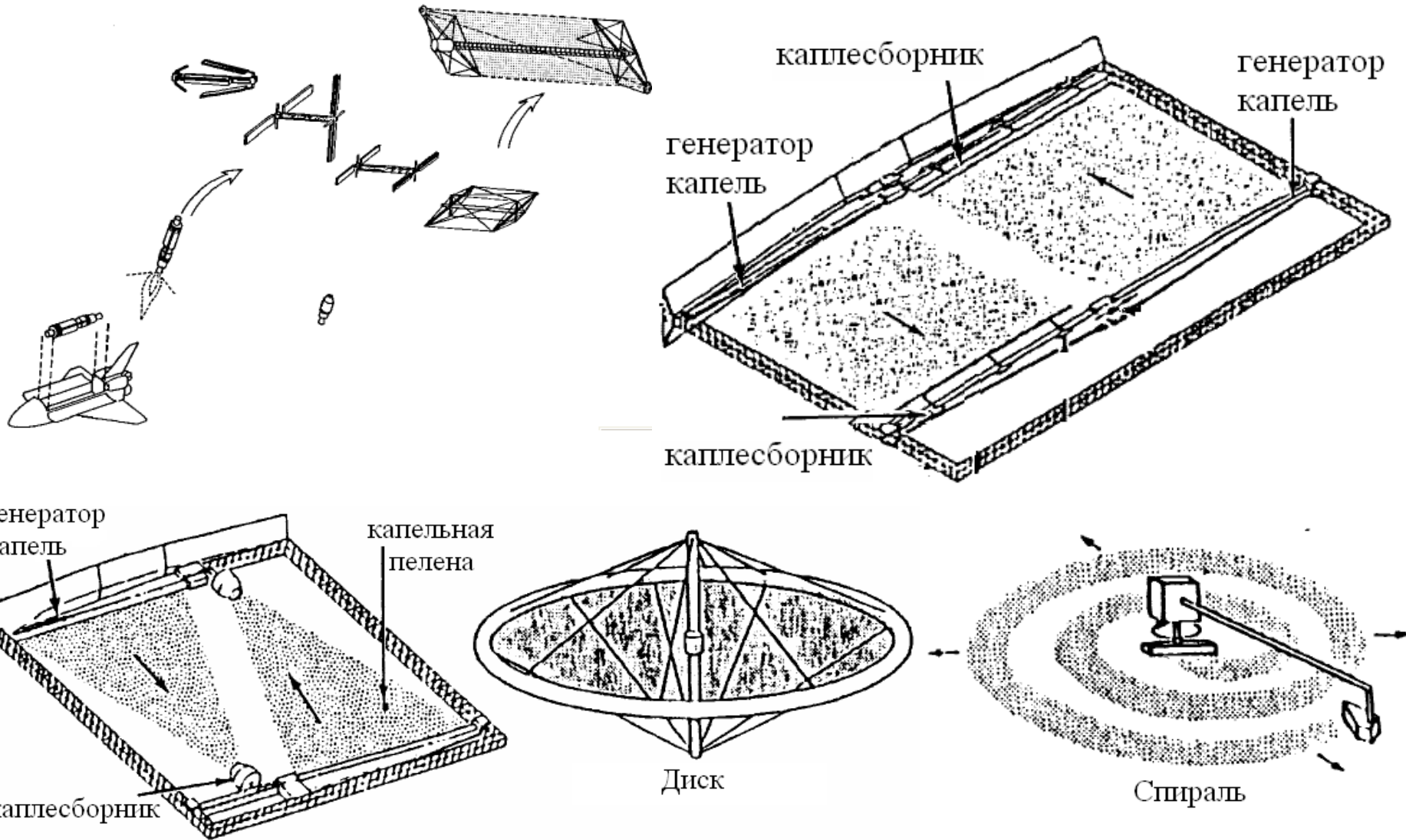
1. Введение

2. Теплообмен в движущейся
капельной пленке

3. Течение в каплеуловителе

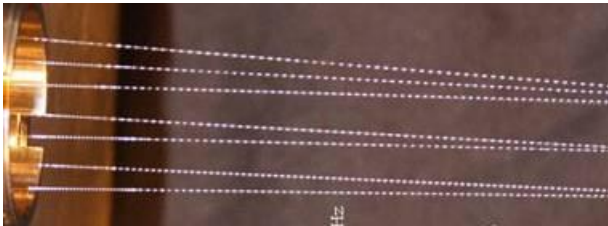
4. Заключение

Мотивация: перспективные космические капельные радиаторы



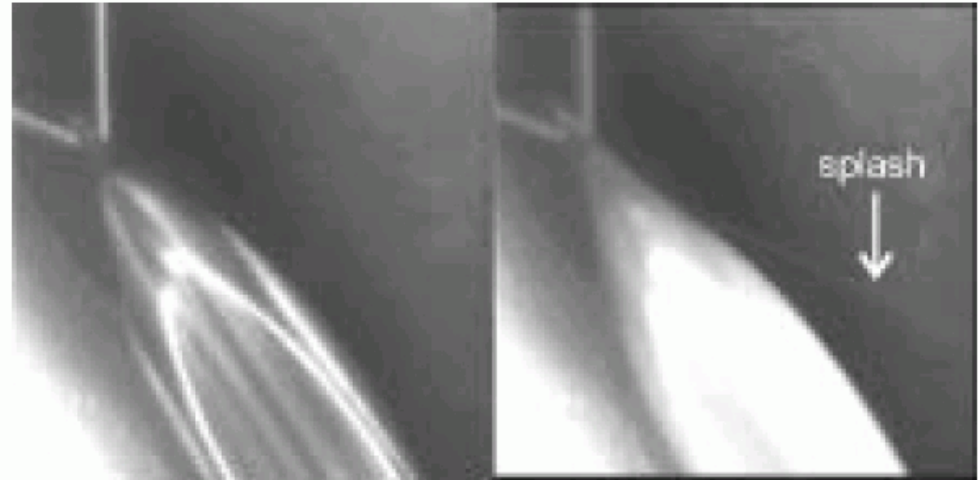
Проблемы реализации

Создание параллельных друг
другу струек капель



Коротеев А.А. (2006)

Возможные потери хладагента
при сборе капель



T. Totani, M. Itami et al. (2002)

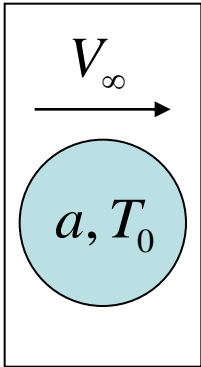
Эффективность работы при
большом количестве струек

?

Структура течения в
каплеуловителе

?

Охлаждение капли за счет излучения



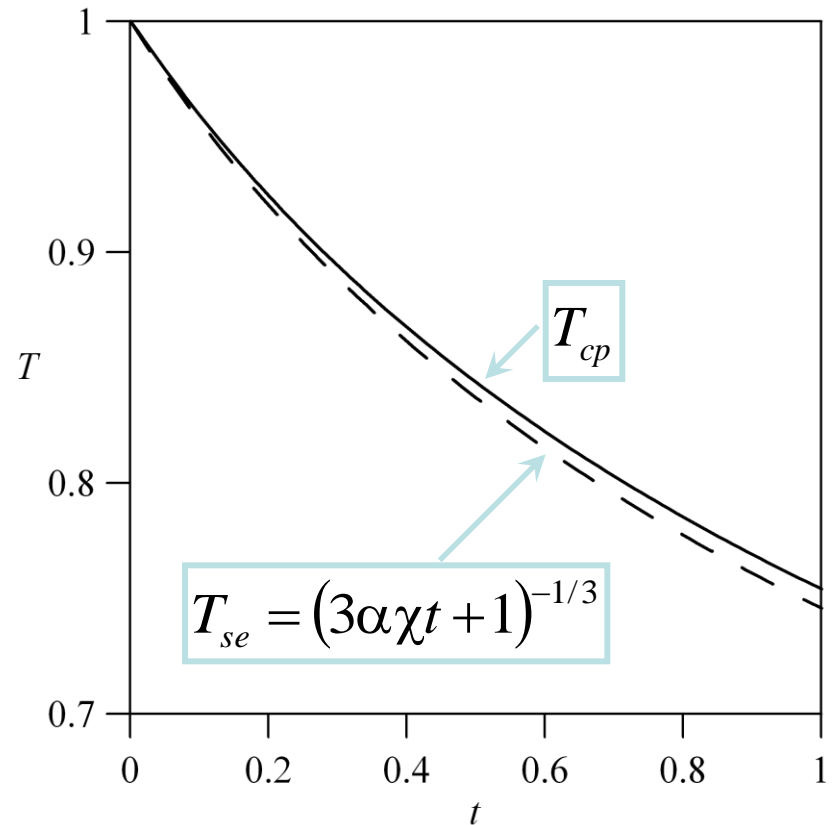
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{Fo} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$r = 1: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{\alpha \chi}{3\text{Fo}} T^4$$

$$\text{Fo} = \frac{\lambda l}{\rho c_s a^2 V_\infty}$$

$$\alpha = \frac{3\sigma T_0^3 l}{a \rho c_s V_\infty}$$

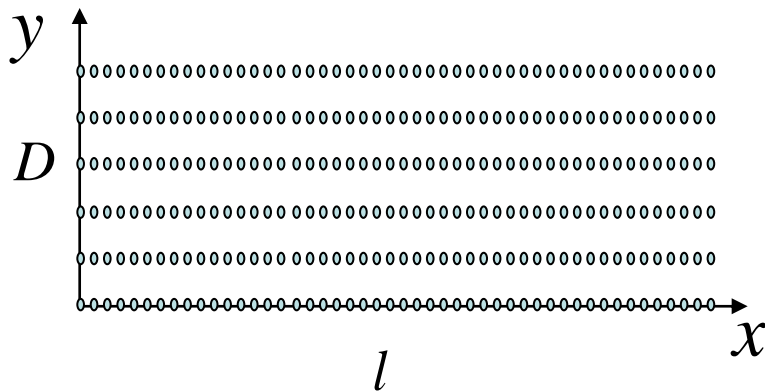
$$\frac{dT_{se}}{dt} = -\alpha \chi T_{se}^4$$



$$r = \frac{r^*}{a}, \quad T = \frac{T^*}{T_0}, \quad t = \frac{t^* V_\infty}{l}$$

σ , Вт/м ² К ⁴	c_s , м ² /сек ² К	ρ , кг/м ³	T_0 , К	l , м	V_∞ , м/сек	$a \cdot 10^6$, м	λ , Вт/м К	Fo	α
$5,7 \cdot 10^{-8}$	2000	850	360	20	1	200	0,125	37	0,47

Радиационный теплообмен в капельной пленке



$$\mathbf{q}_R = -\frac{4l_R\sigma}{3}\nabla T^{*4} \quad l_R = (\pi a^2 n_s^*)^{-1}$$

$$D \ll l \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4}{3}\alpha \frac{\partial}{\partial y} \left(T^3 \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

$$y=0: \quad T = \gamma \frac{\partial T}{\partial y}$$

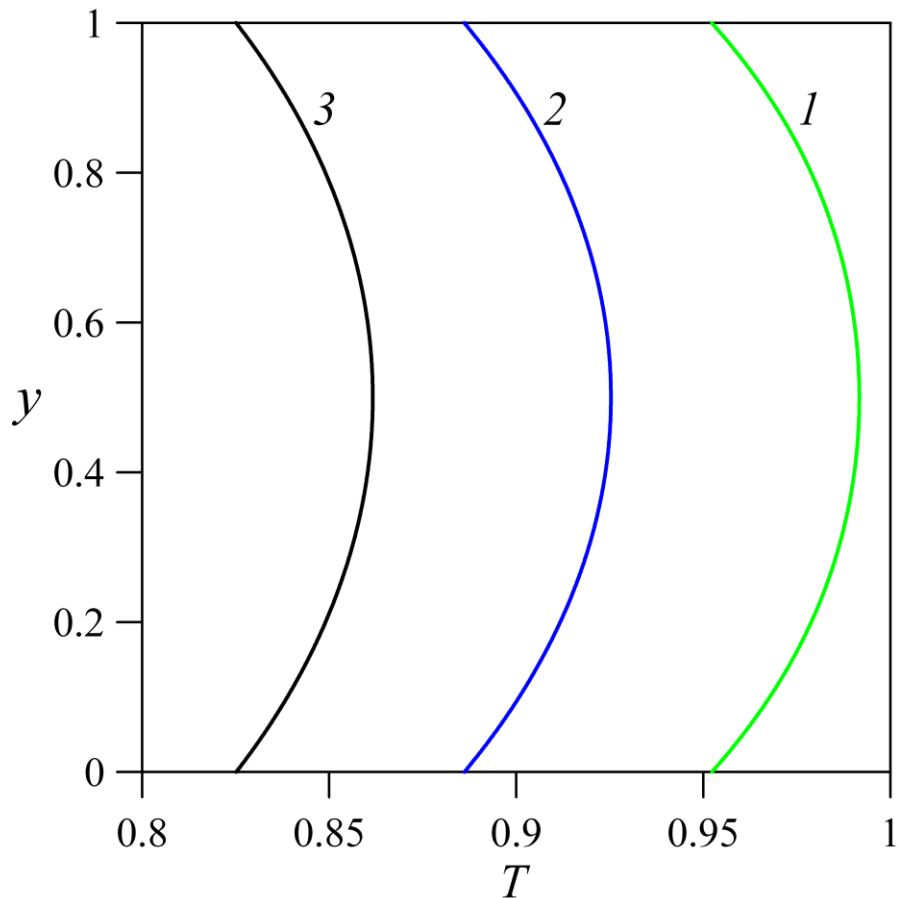
$$y = \delta_p / 2: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$x=0: \quad T = 1$$

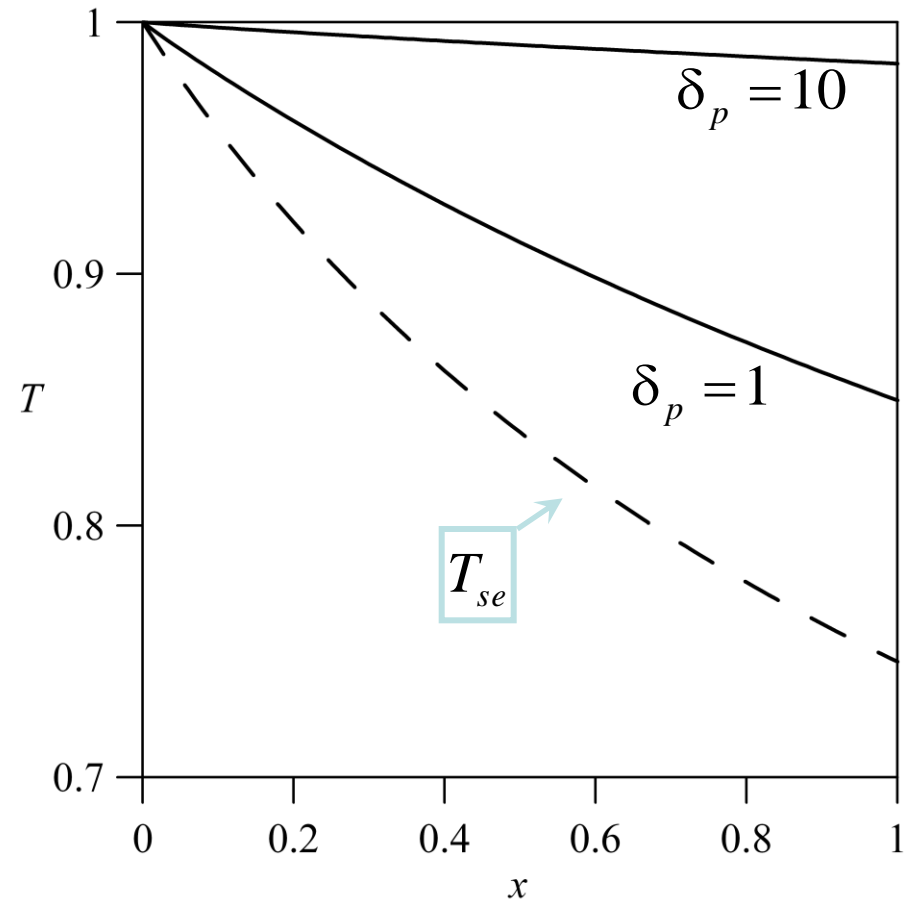
$$\alpha = \frac{3\sigma T_0^3 l}{ac_s \rho V_\infty}, \quad \gamma = \frac{16}{3\chi}, \quad \delta_p = \frac{D}{l_R}$$

$$x = \frac{x^*}{l}, \quad y = \frac{y^*}{l_R}, \quad T = \frac{T^*}{T_0}$$

Результаты

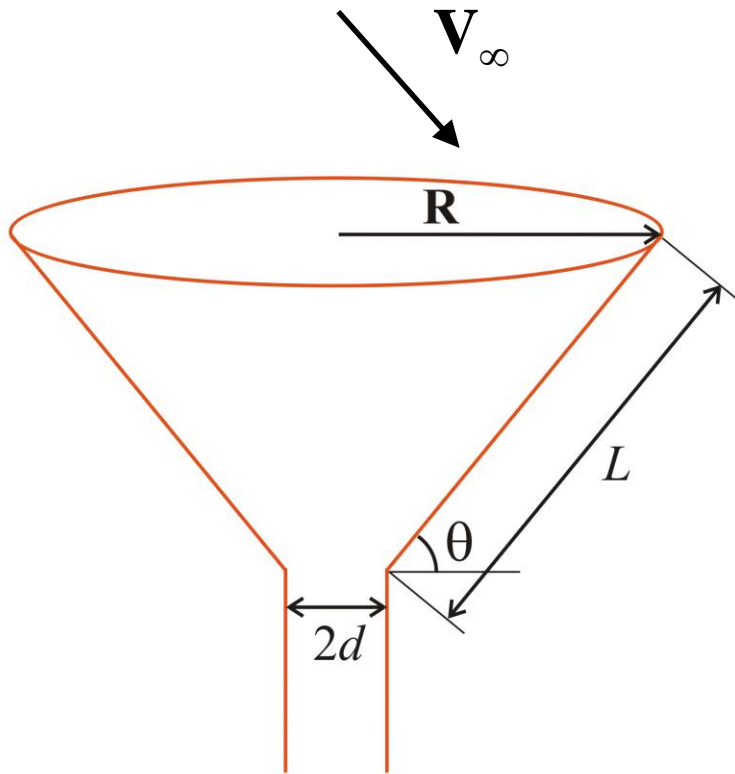


Распределение температуры внутри капельной пелены в трех сечениях по x : 1 – $x = 0,1$; 2 – $x = 0,5$; 3 – $x = 1$ ($\alpha = 0,47$, $\gamma = 6,67$).



Зависимость температуры капель от координаты x

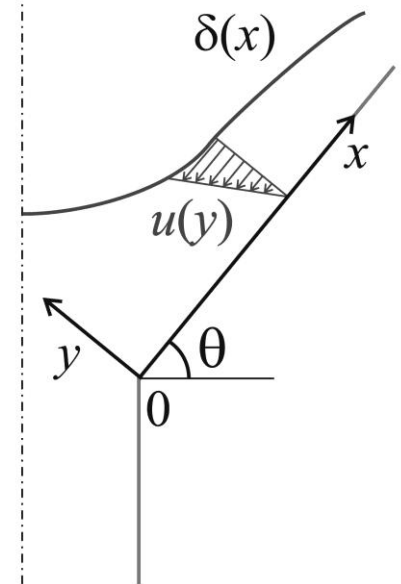
Течение в каплеуловителе



$$\varepsilon = \frac{\mu_w^*}{\rho_f^* V_\infty L} = \frac{1}{\text{Re}_f}$$

$$\rho_s^* V_\infty L \sim \rho_f^* \delta^* V_f$$

$$\delta^* \sim L \varepsilon^{1/2}$$



$$V_f \sim V_\infty k$$

$$k = \text{Re}_f^{1/2} \tau_s$$



$k \sim 1$ – «быстрое»
течение

$k \ll 1$ – «медленное»
течение

Система уравнений

 $k \sim 1$

$$\frac{\partial(u_f r)}{\partial x} + \frac{\partial(v_f r)}{\partial \xi} + \frac{\partial w_f}{\partial \varphi} = 0 \quad k \frac{w_f^2 \sin \theta}{r} = -\frac{\partial p}{\partial \xi}$$

$$k \left(u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} + \frac{w_f}{r} \frac{\partial u_f}{\partial \varphi} - \frac{w_f^2 \cos \theta}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} \right)$$

$$k \left(u_f \frac{\partial w_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial w_f}{\partial \xi} + \frac{w_f}{r} \frac{\partial w_f}{\partial \varphi} + \frac{w_f u_f \cos \theta}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mu_f \frac{\partial w_f}{\partial \xi} \right)$$

$$k \left(u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial \xi} + \frac{w_f}{r} \frac{\partial T_f}{\partial \varphi} \right) = \frac{1}{\text{Pr}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial \xi^2} + \text{Ec} \mu_f k^2 \left[\left(\frac{\partial u_f}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_f}{\partial \xi} \right)^2 \right]$$

$$\text{Pr} = \frac{c_f \mu_w^*}{\lambda_f}$$

$$\text{Ec} = \frac{V_\infty^2}{c_f (T_\infty^* - T_w^*)}$$

$$r = d + x \cos \theta$$

Граничные условия

На поверхности каплеуловителя

$$\xi = 0: \quad u_f = v_f = 0 \quad w_f = 0 \quad T_f = 0$$

На поверхности пленки

$$\xi = \delta(x): \quad v_f - u_f \frac{\partial \delta}{\partial x} - \frac{w_f}{r} \frac{\partial \delta}{\partial \varphi} = v_s \quad u_s v_s = k v_s u_f - \mu_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi}$$

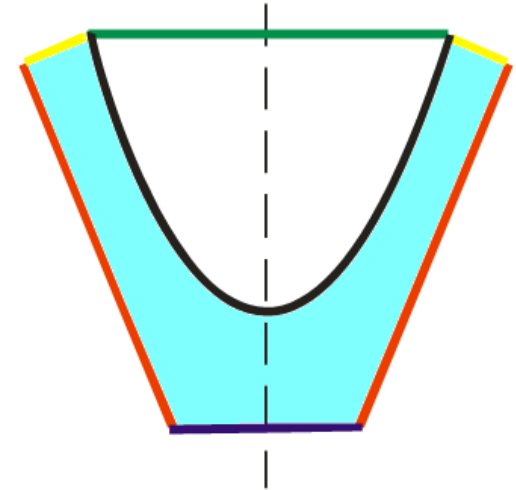
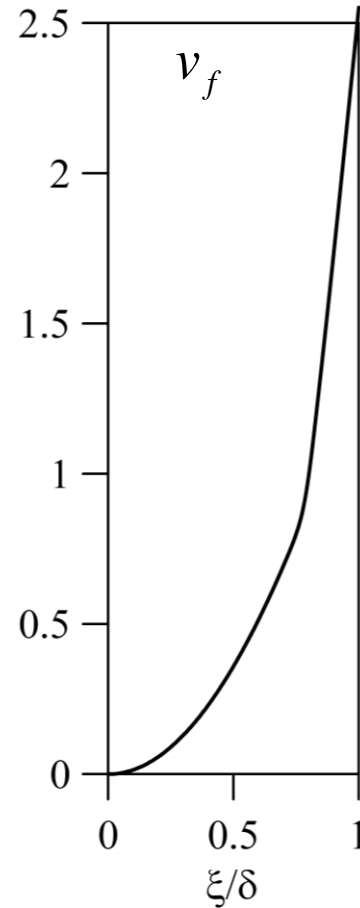
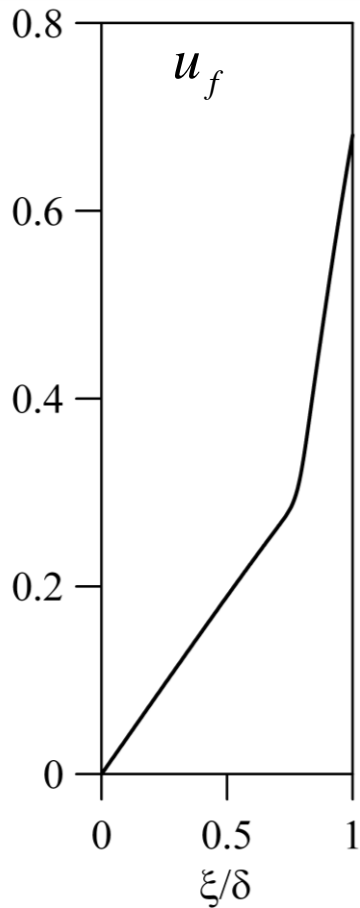
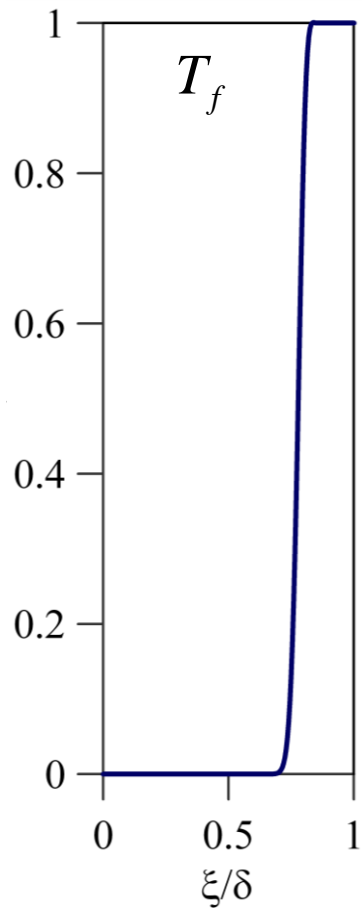
$$w_s v_s = k v_s w_f - \mu_f \frac{\partial w_f}{\partial \xi} \quad p = v_s^2$$

$$k v_s \left(\frac{1 - k^2 (u_f^2 + w_f^2)}{2} + \frac{1 - T_f}{\text{Ec}} \right) +$$

$$+ k^2 \mu_f \left(u_f \frac{\partial u_f}{\partial \xi} + w_f \frac{\partial w_f}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\text{Pr Ec}} \frac{\partial T_f}{\partial \xi} = 0$$

$$x = 1: \quad \delta = \delta_0 \quad u_f = C_1 \xi \quad w_f = C_2 \xi \quad T_f = 0$$

Результаты



$$p_{cp}^* = \rho_s V_\infty^2 \left[1 - \tau_s \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^2 \right]$$

$$S_1 = \pi d^2$$

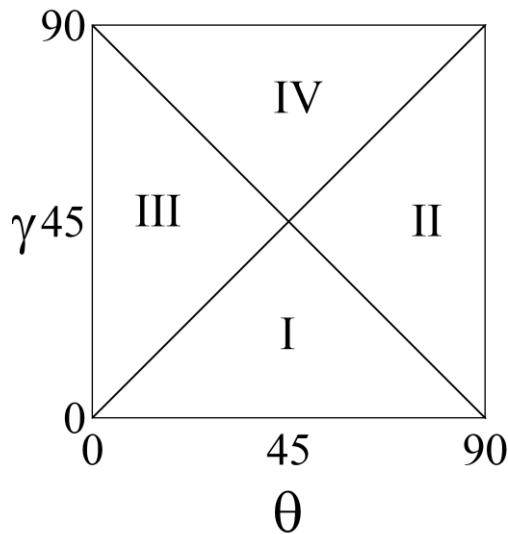
$$S_0 = \pi (d + L \cos \theta)^2$$

$$p_{cp}^* \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ атм}$$

Медленное течение

$$k = 0$$

$$u_f = -u_s v_s \xi \quad w_f = -w_s v_s \xi \quad v_f = \frac{\xi^2}{2r} \left(\frac{\partial(w_s v_s)}{\partial \varphi} + u_s v_s \cos \theta \right)$$



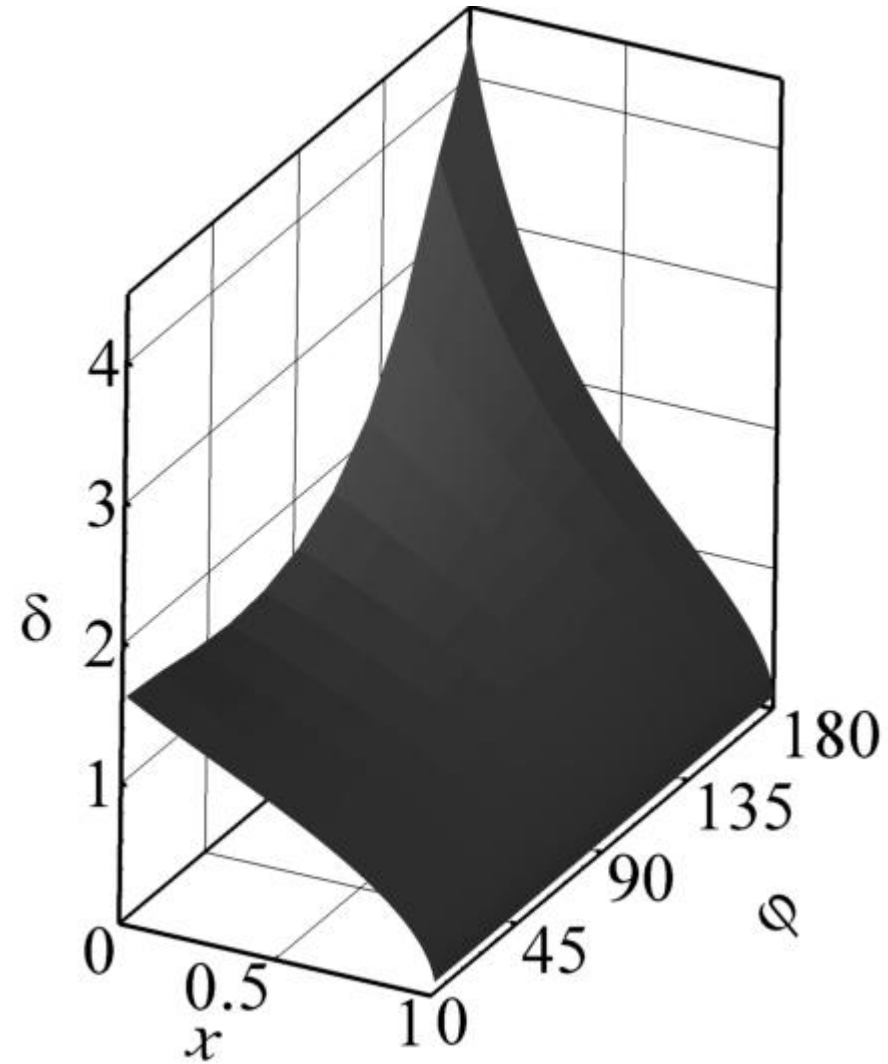
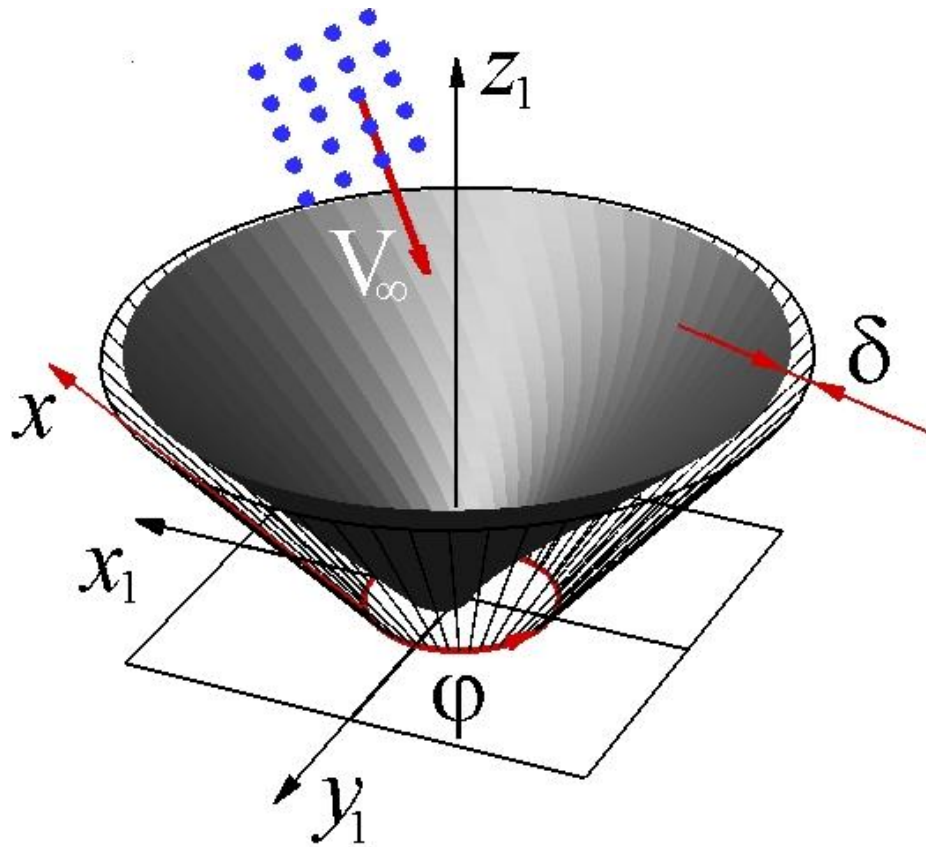
$$u_s = -\sin \gamma \cos \varphi \cos \theta - \sin \theta \cos \gamma$$

$$v_s = \sin \gamma \cos \varphi \sin \theta - \cos \theta \cos \gamma$$

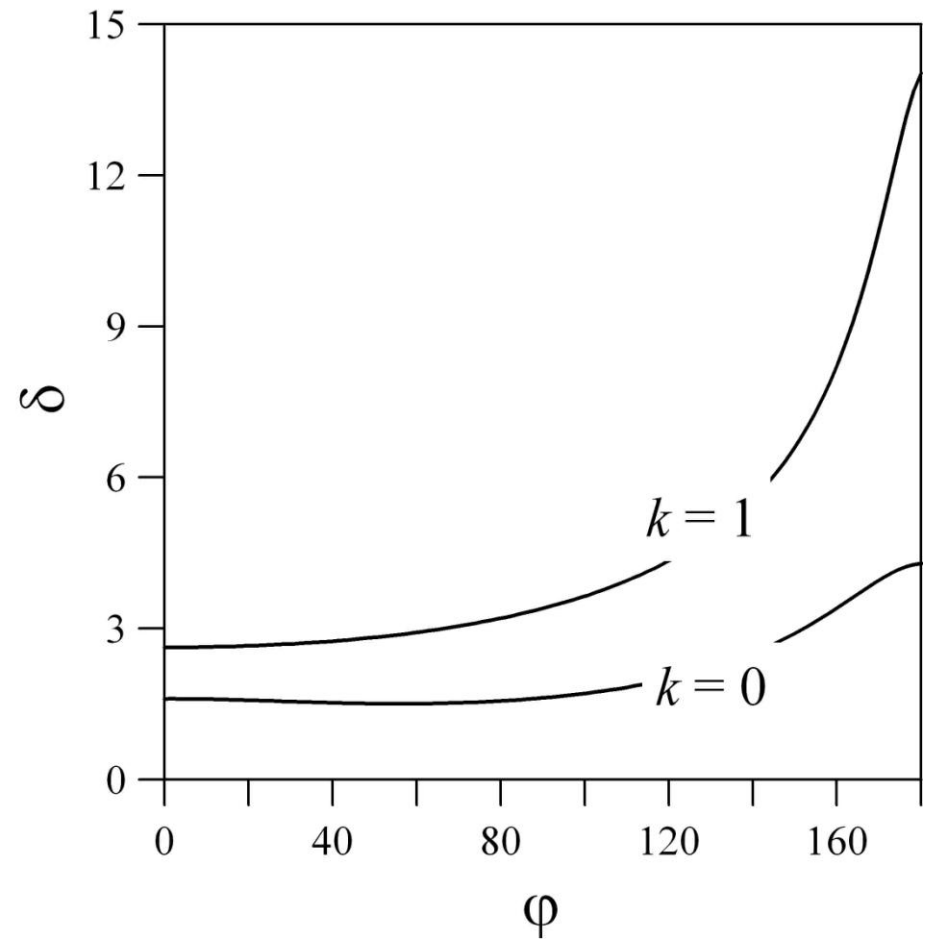
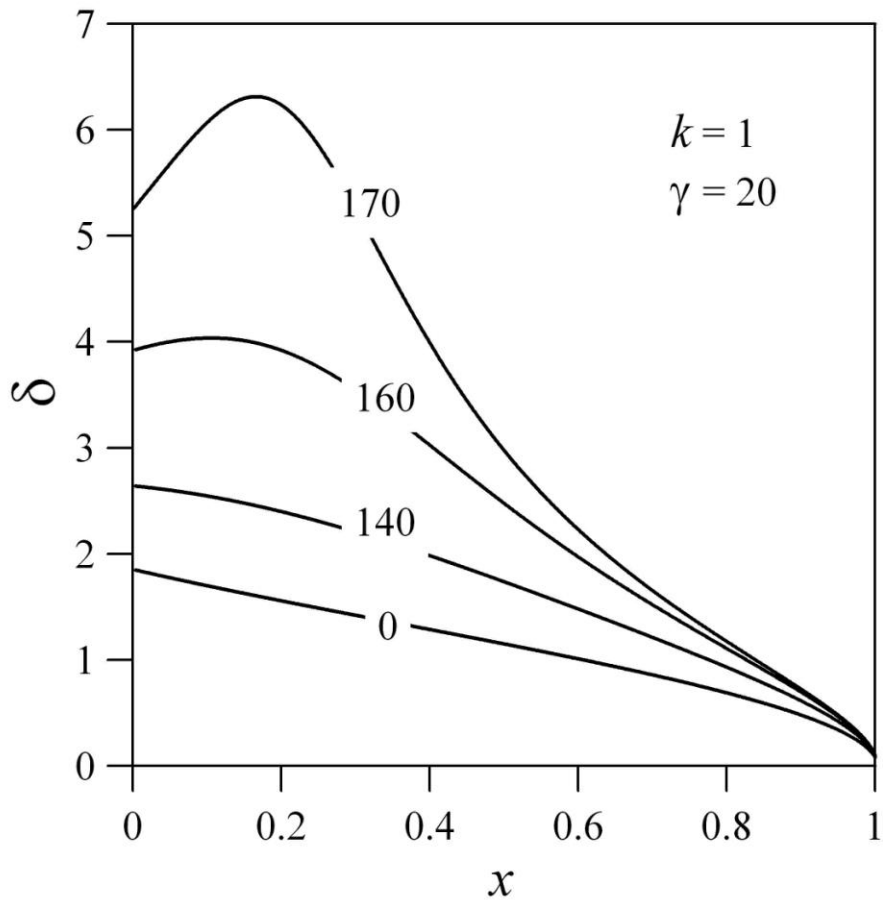
$$w_s = \sin \gamma \sin \varphi$$

$$u_s v_s r (\delta^2)'_x + w_s v_s (\delta^2)'_\varphi = 2r v_s - \delta^2 \left(\frac{\partial(w_s v_s)}{\partial \varphi} + u_s v_s \cos \theta \right)$$

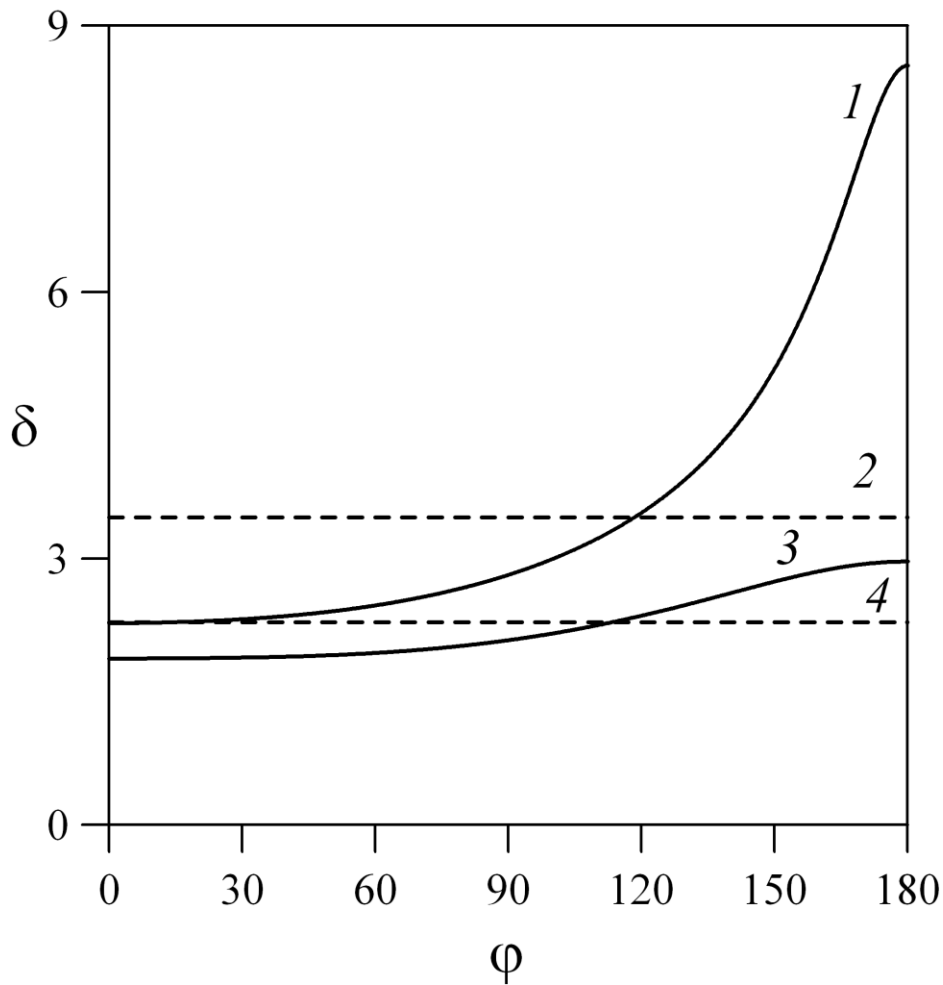
Результаты



Результаты



Результаты



Толщина пленки в горловине воронки ($x = 0$) в зависимости от угла ϕ . Кривые 1 и 2 – $k = 0.5$, 3 и 4 – $k = 0$; 1 и 3 – $\gamma = 10^\circ$, 2 и 4 – $\gamma = 0^\circ$

Заключение

- Рассмотрен процесс охлаждения потока монодисперсных капель вакуумного масла в условиях открытого космоса.
- В условиях применимости к капельной пленке модели оптически толстого слоя выведено уравнение притока тепла. Построены профили температуры потока капель на различных расстояниях от генератора капель.
- Построена асимптотическая модель пленочного течения вакуумного масла в каплеуловителе. Форма поверхности пленки, а также профили скорости и температуры определены из параметрических численных расчетов.
- Проведено исследование трехмерных эффектов, вызванных отклонением потока капель хладагента от направления, параллельного оси каплеуловителя.