

# Исследование режимов виброкипящего гранулированного слоя с использованием пакета OpenFOAM

**Н.С. Орлова<sup>1,2,3</sup>, Я.Н. Качалкина<sup>2</sup>, А.Р. Плиева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Южный математический институт Владикавказского научного центра  
РАН и Правительства РСО-А;

<sup>2</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет);

<sup>3</sup> Финансовый университет при Правительстве РФ.

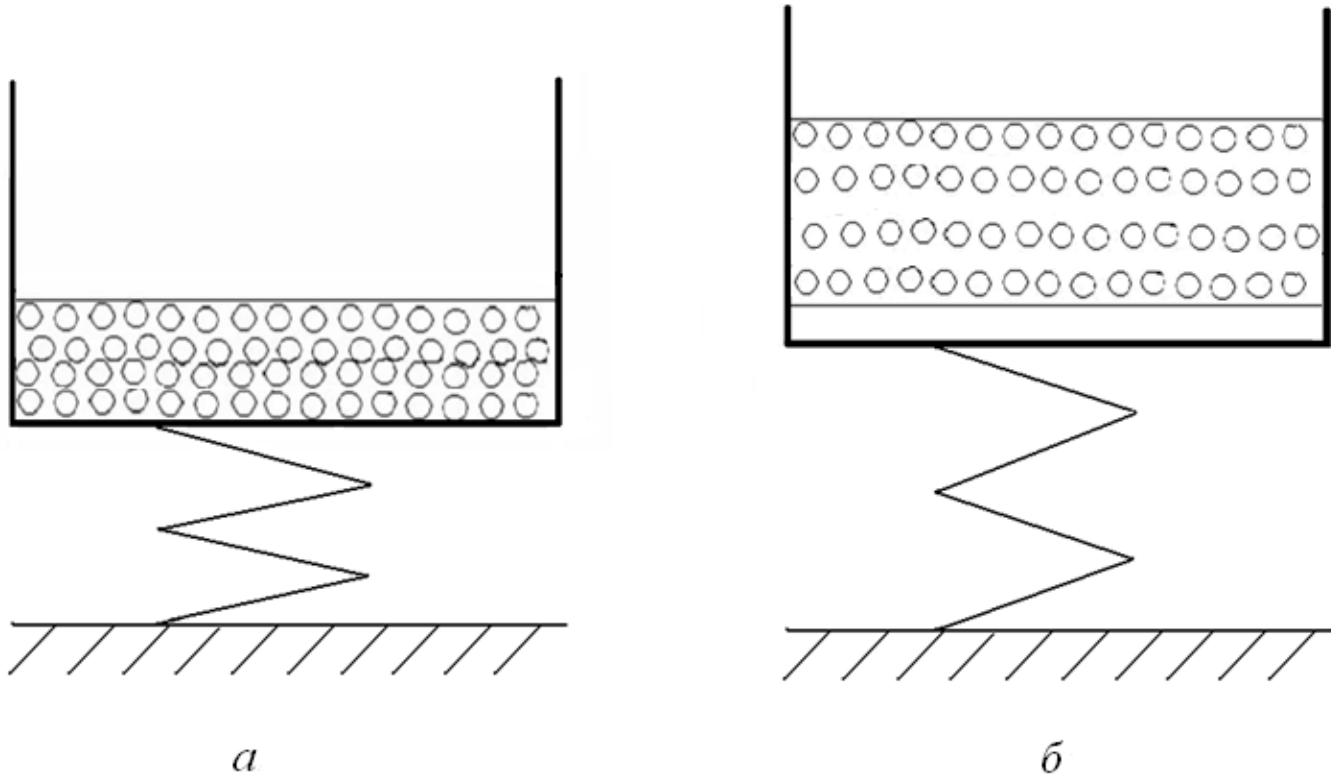
Условие возникновения виброожижения:

$$\frac{A\omega^2}{g} > 1; \quad (1)$$

$A$  и  $\omega$  – амплитуда и циклическая частота колебаний полки;

$\omega = 2\pi f$  ( $f$  – частота колебаний полки);

$g$  – ускорение свободного падения.



**Рис.1.** Слой гранулированного материала в состоянии покоя (*а*) и под воздействием колебаний полки (*б*).

## Наши ресурсы доступны для Ваших задач в режиме 24/7

Однако нам удается экономить энергию благодаря разработанным алгоритмам динамического отключения неиспользуемых вычислительных узлов. Вы можете быть уверены в том, что в любой момент времени мы включаем ровно столько узлов, сколько необходимо вашей задаче.

С помощью UniHUB Вы можете:

- проводить исследования и обмениваться опытом **внутри групп**,
- обучать и проходить обучение с **помощью учебных курсов и обучающих материалов**,
- добавлять приложения и материалы, используя **удобную форму загрузки**.

UniHUB - виртуальная вычислительная лаборатория, ориентированная на повышение эффективности процессов разработки, внедрения и моделирования вычислительных задач.

Предоставляет возможность совместной работы представителей различных научно-исследовательских сообществ.

[Информация о ресурсах](#) | [Добавить проект](#)

### РЕСУРСЫ

Популярные теги: [UniCFDc1](#) [OpenFOAM](#)

[SALOME](#) [UniCFDc2](#) [ParaView](#)

[Workspace](#) [WebDAV](#) [System](#) [GPGPU](#)

### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

[OCFD Console](#)

в разделе Приложения, 05 октября 2012

[RapidMiner](#)

в разделе Приложения, 03 октября 2012

### СОБЫТИЯ

**ДЕК**  
**06**

III Международная конференция:  
Облачные вычисления.  
Образование. Исследования.  
Разработка 2012

*Главная страница сайта Unihub.ru*

**twoPhaseEulerFoam** - солвер OpenFoam для описания динамики кипящего (псевдооживленного) гранулированного слоя

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_\varphi) + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \bar{U}_\varphi) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_\varphi \bar{U}_\varphi) + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \bar{U}_\varphi \bar{U}_\varphi) + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \bar{R}_{\varphi,eff}) = -\frac{\alpha_\varphi}{\rho_\varphi} \nabla P + \alpha_\varphi (\bar{g} - \bar{a}) + \bar{M}_\varphi; \quad (2)$$

$$\rho_\varphi = const$$

$$\bar{a} = (a_x, a_y, a_z) = (0, a_y, 0)$$

$$a_y = -A\omega^2 \sin(\omega t)$$

$\alpha_\varphi$  - объемная доля фазы  $\varphi$ ;  $P$  - давление газовой фазы;

$\bar{R}_{\varphi,eff}$  - тензор эффективных напряжений;

$\bar{M}_\varphi$  - член, моделирующий межфазной взаимодействие.

Для фазы  $b$  – фаза газа

$$\bar{R}_{\varphi,eff} = -v_{\varphi,eff} \left[ \nabla \bar{U}_{\varphi} + (\nabla \bar{U}_{\varphi})^T \right] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{U}_{\varphi}) \bar{I} + \frac{2}{3} k_{\varphi} \bar{I}$$

$$v_{\varphi,eff} = v_{\varphi} + v_{\varphi,t}$$

Для фазы  $a$  – фаза твердых частиц

$$\bar{R}_{\varphi,eff} = \bar{\tau}_a \quad v_{\varphi,eff} = \mu_a / \rho_a$$

$$\bar{\tau}_a = \mu_a \left[ \nabla \bar{U}_{\varphi} + (\nabla \bar{U}_{\varphi})^T \right] + \left( \lambda_a - \frac{2}{3} \mu_a \right) (\nabla \cdot \bar{U}_{\varphi}) \bar{I}$$

$$\bar{D}_s = \frac{1}{2} \left[ \nabla \bar{U}_a + (\nabla \bar{U}_a)^T \right]$$

Для фазы  $b$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_b k_b) + \nabla \cdot (\alpha_b \bar{U}_b k_b) - \nabla^2 (\sigma_k \nu_{b,\text{eff}} k_b) = \alpha_b G - \alpha_b \varepsilon_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_b \varepsilon_b) + \nabla \cdot (\alpha_b \bar{U}_b \varepsilon_b) - \nabla^2 (\sigma_\varepsilon \nu_{b,\text{eff}} \varepsilon_b) = C_1 \alpha_b G \frac{\varepsilon_b}{k_b} - C_2 \alpha_b \frac{\varepsilon_b^2}{k_b} \quad (4)$$

$$G = 2\nu_{b,t} \left[ \nabla \bar{U}_b \cdot \text{dev}(\nabla \bar{U}_b + (\nabla \bar{U}_b)^T) \right]$$

$$\nu_{b,t} = C_\mu \frac{k_b^2}{\varepsilon_b}$$

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$C_\mu = 0.09; \quad C_1 = 1.44; \quad C_2 = 1.92$$

$$\overline{M}_\varphi = \frac{1}{\rho_\varphi} \overline{M}_{drag}$$

$$\overline{M}_{drag} = \alpha_a \alpha_b K \overline{U}_r \quad (5)$$

$$K = 150 \frac{\alpha_a \mu_b}{(\alpha_b d_a)^2} + 1.75 \frac{\rho_b \overline{U}_r}{\alpha_b d_a}; \quad (\alpha_b \leq 0.8)$$

$$K = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_b \overline{U}_r}{d_a}; \quad (\alpha_b > 0.8)$$

$$\overline{U}_r = \overline{U}_a - \overline{U}_b$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \cdot \text{Re}_p^{0.687}); & \text{Re}_p < 1000 \\ 0.44; & \text{Re}_p \geq 1000 \end{cases}$$

$$\text{Re}_p = \frac{\overline{U}_r d_a \rho_b \alpha_b}{\mu_b}$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial(\rho_a \alpha_a \theta)}{\partial t} + \frac{3}{2} \nabla \cdot [\rho_a \alpha_a \theta \bar{U}_a] = \left( -\nabla P_a \bar{\mathbf{I}} + \bar{\boldsymbol{\tau}}_a \right) : \nabla \bar{U}_a - \nabla \cdot (k_\theta \nabla \theta) - \gamma_{\text{inelas}} + \gamma_{\text{rel}}; \quad (6)$$

$k_\theta$  - коэффициент переноса энергии флуктуаций;

$\gamma_{\text{inelas}}$  - скорость диссипации кинетической энергии;

$\gamma_{\text{rel}}$  - выражение, учитывающее относительное движение между двумя фазами

$$\theta = \left( \frac{- (K_1 \alpha_a + \rho_a) \text{tr}(\bar{D}_s) + \sqrt{(K_1 \alpha_a + \rho_a)^2 \text{tr}^2(\bar{D}_s) + 4K_4 \alpha_a \left[ 2K_3 \text{tr}(\bar{D}_s^2) + K_2 \text{tr}^2(\bar{D}_s) \right]}}{2\alpha_a K_4} \right)^2 \quad (7)$$

$$K_1 = 2(1+e)\rho_a g_0;$$

$$K_2 = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} d_a \rho_a (1+e) \alpha_a g_0 - \frac{2}{3} K_3;$$

$$K_3 = \frac{d_a \rho_a}{2} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{3(3-e)} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1+e)(3e-1) \alpha_a g_0 \right] + \frac{8\alpha_a}{5\sqrt{\pi}} g_0 (1+e) \right);$$

$$K_4 = \frac{12(1-e)^2 \rho_a g_0}{d_a \sqrt{\pi}}; \quad g_0 = \frac{3}{5} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_a}{\alpha_{a\text{max}}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1}$$



## Значения входных параметров задачи.

	Описание	Значение
1	плотность твердой фазы (частицы стекла), $\rho_a$ [кг/м <sup>3</sup> ]	2500
2	плотность газовой фазы (воздуха), $\rho_b$ [кг/м <sup>3</sup> ]	1,2
3	вязкость газовой фазы (воздуха), $\mu_b$ [Па×с]	$1,5 \times 10^{-5}$
4	коэффициент восстановления частица-частица, $e$ [-]	0,8
5	начальное значение объемной доли частиц в слое, $\alpha_{a0}$ [-]	0,6
6	начальная высота слоя, $H_0$ [м]	0,2-0,5
7	ширина слоя, $L$ [м]	0,4
8	толщина слоя, $W$ [м]	0,4
9	диаметр частиц, $d_a$ [м]	0,00175 0,0003

**Размеры вычислительной области:** высота – 0.4 м, ширина - 0.4 м, толщина - 0.4 м.

**Общее время расчетов** (реальное время) - 2 с.

При этом использовался шаг по времени, равный  $1 \times 10^{-5}$  с.

Шаг по координате x равен 0.005 м, шаг по координате y - 0.005 м;

шаг по координате z - 0.005 м).

## Начальные и граничные условия

Задача решалась в трехмерном приближении. Изменились начальные и граничные условия. В связи с тем, что введена относительная система отсчета, используются следующие начальные условия:

$$\bar{U}_a = 0; \bar{U}_b = 0; P = 0; \alpha_a = 0,6; \theta = 0.$$

Далее представлены граничные условия на левой, правой, передней и задней стенках, а также на нижней стенке (полке):

$$\bar{U}_a = 0; \bar{U}_b = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$

Граничные условия на верхней свободной поверхности:

$$\nabla \bar{U}_a = 0; \nabla \bar{U}_b = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$



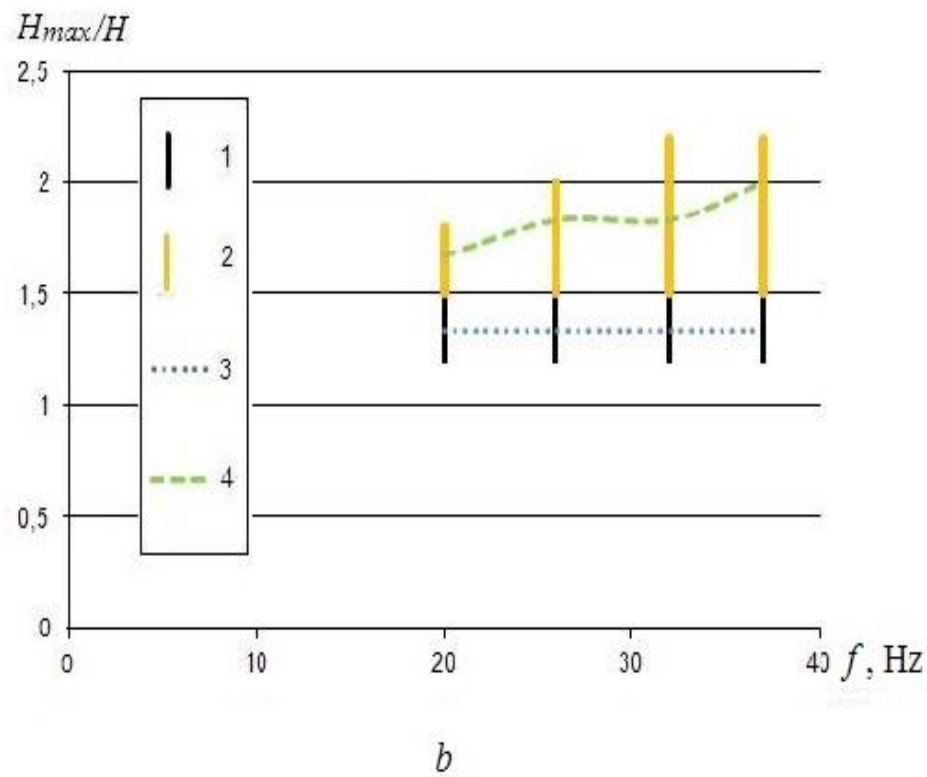
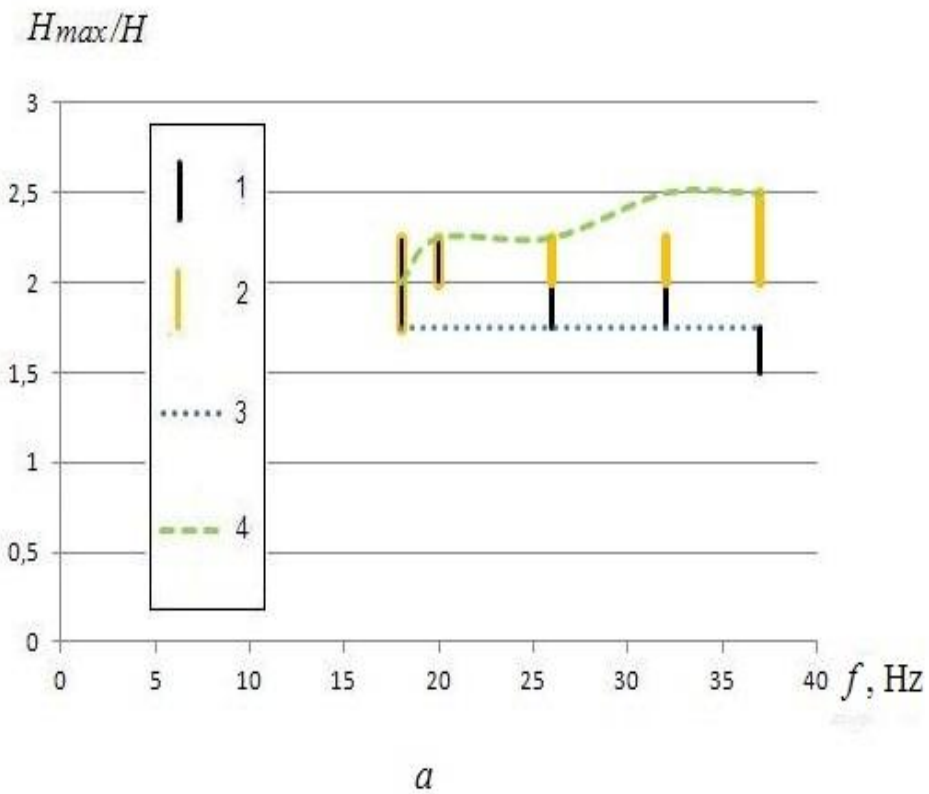
**Рис. 2 а.** Слой частиц доломита  
( $H = 20$  мм).



**Рис. 2 б.** Виброкипящий слой частиц  
доломита ( $A = 2,5$  мм,  $f = 18$  Гц).



**Рис. 3.** Виброкипящий слой.  $A = 2,5$  мм,  $f = 32$  Гц.



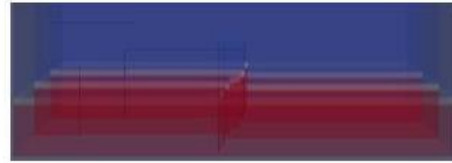
**Рис.4.** Зависимость степени расширения слоя от частоты колебаний полки.

*a* -  $H = 20$  мм, *b* -  $H = 30$  мм.

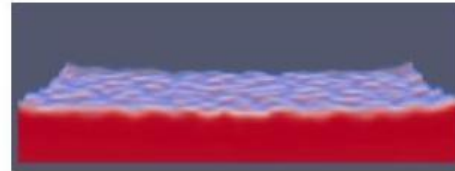
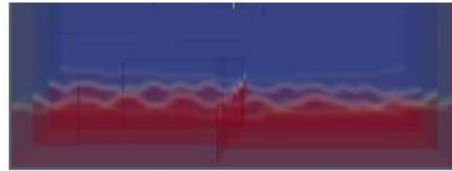
Обозначения: 1,3 – верхняя граница, определенная у подошвы волн сыпучего материала;  
 2,4 – верхняя граница, определенная на гребне волн сыпучего материала; 1,2 – эксперимент;  
 3,4 – результаты расчетов. Диаметр частиц доломита 1-2,5 мм.  $A = 2,5$  мм.

*Частота колебаний  $f = 20$  Гц*

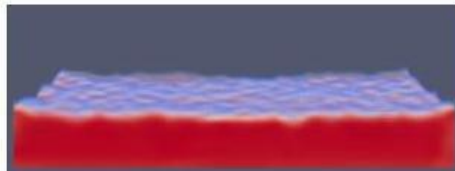
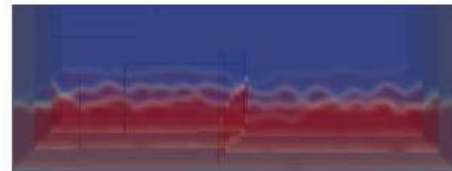
**$t = 0$  с**



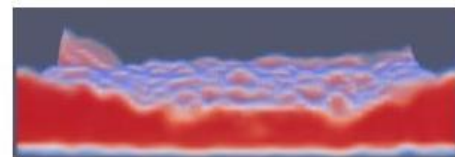
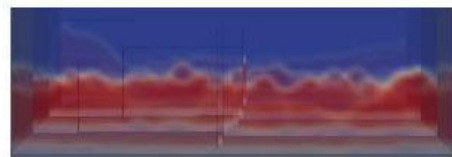
**$t = 1,5$  с**



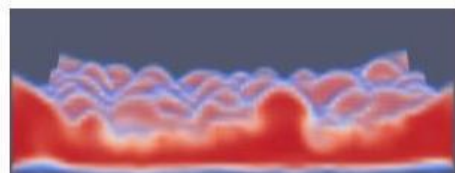
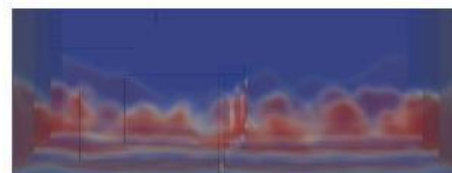
*а) Амплитуда колебаний  $A = 1,5$  мм*



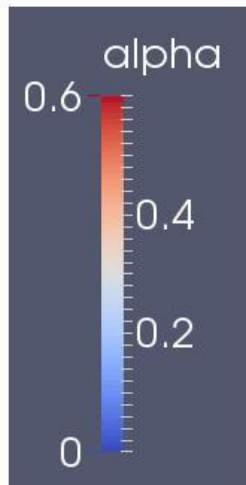
*б) Амплитуда колебаний  $A = 3$  мм*



*в) Амплитуда колебаний  $A = 6$  мм*



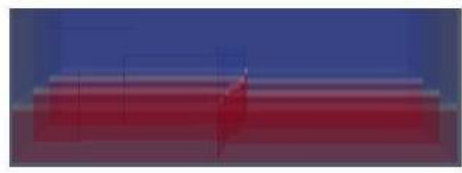
*г) Амплитуда колебаний  $A = 9$  мм*



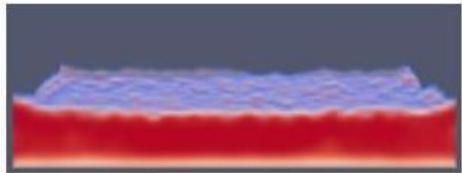
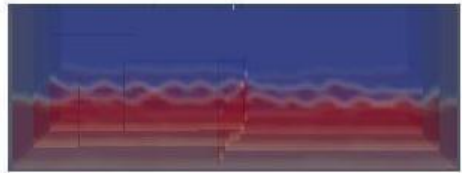


*Частота колебаний  $f = 40$  Гц*

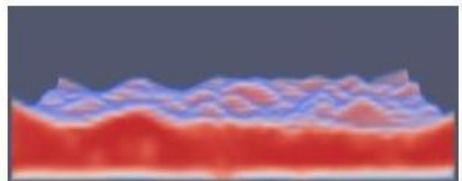
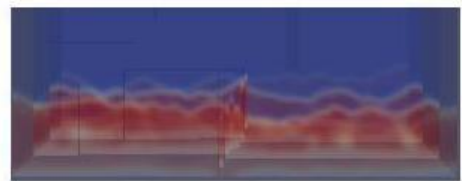
**t = 0 с**



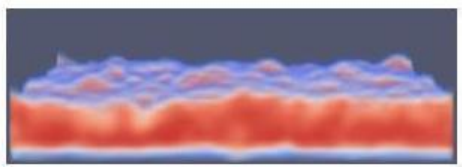
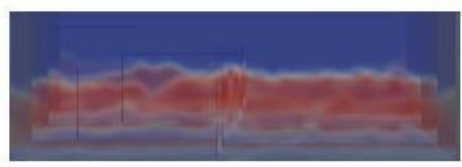
**t = 1,5 с**



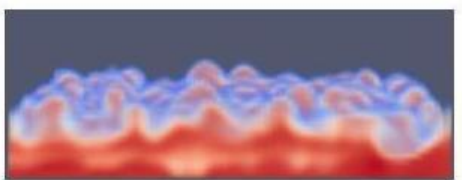
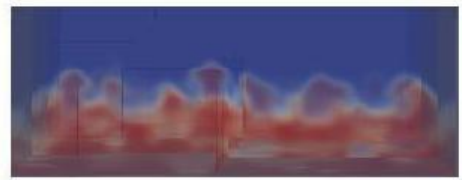
*а) Амплитуда колебаний  $A = 1,5$  мм*



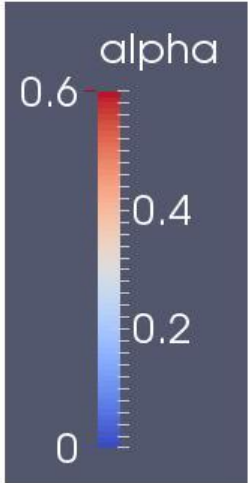
*б) Амплитуда колебаний  $A = 3$  мм*



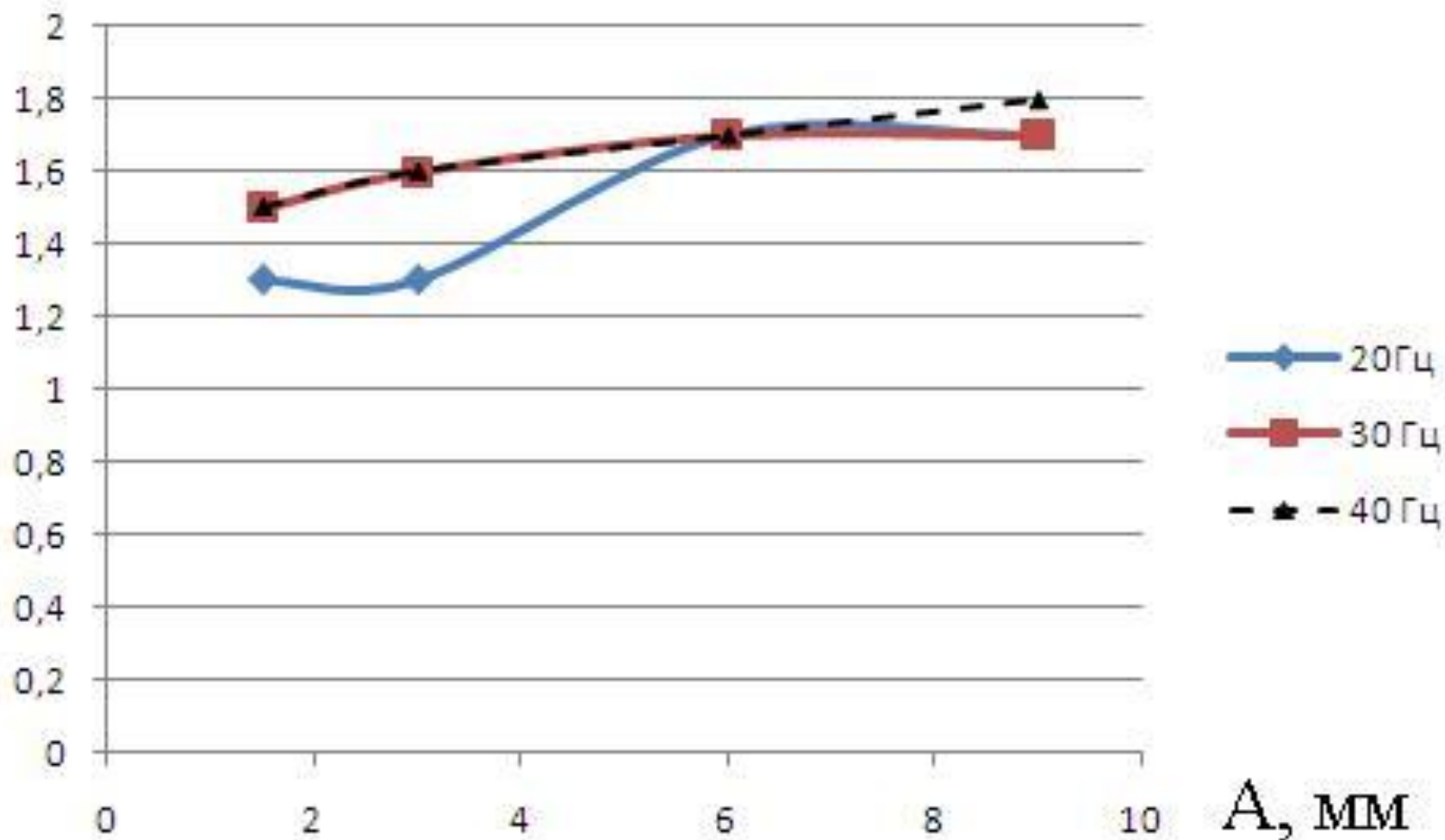
*в) Амплитуда колебаний  $A = 6$  мм*



*г) Амплитуда колебаний  $A = 9$  мм*



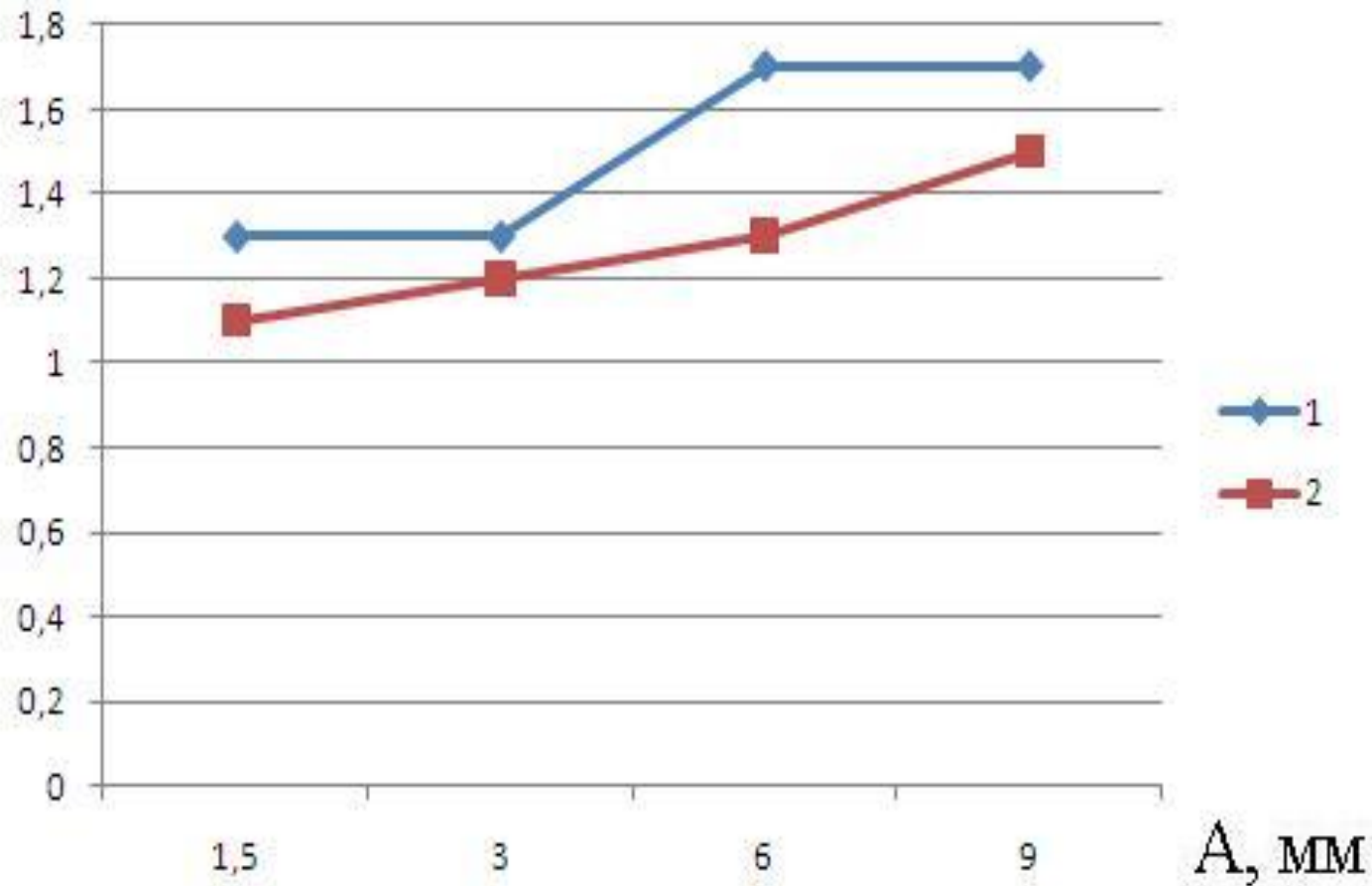
$H_{max}/H$



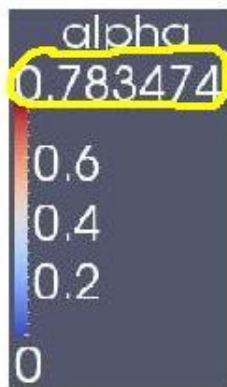
**Рис. 5.** Степень расширения (отношение максимальной высоты слоя к начальному значению) виброкипящего слоя.  $A = 1,5 - 9 \text{ мм}$ ,  $f = 20 - 40 \text{ Гц}$ .



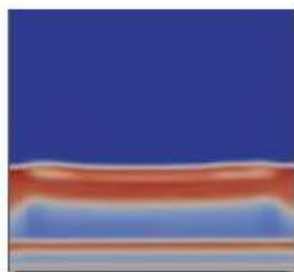
$H_{max}/H$



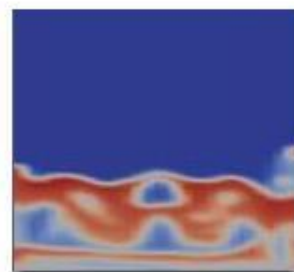
**Рис. 6.** Степень расширения (отношение максимальной высоты слоя к начальному значению) виброкипящего слоя при толщине слоя засыпки  $H = 50$  мм (кривая 1) и  $H = 100$  мм (кривая 2).  $A = 1,5 - 9$  мм,  $f = 20$  Гц.



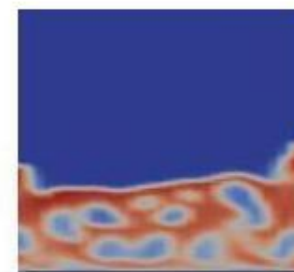
t=0 c



t=0,5 c

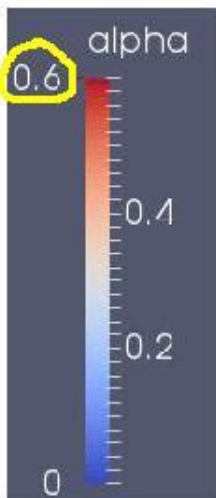


t=1 c

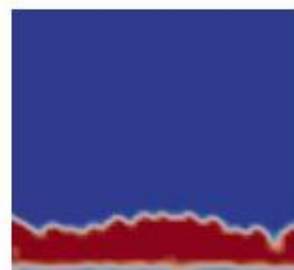


t=2 c

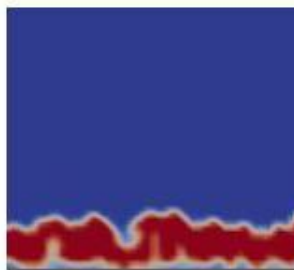
*a*



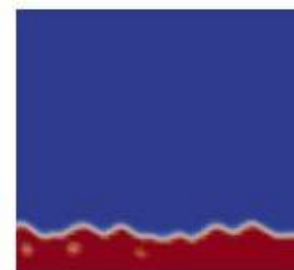
t=0 c



t=0,5 c

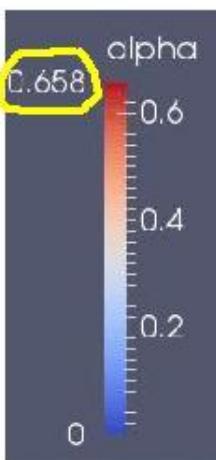


t=1 c

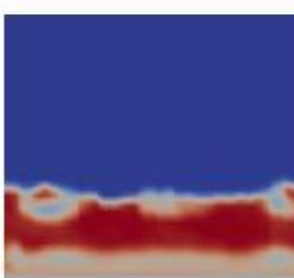


t=2 c

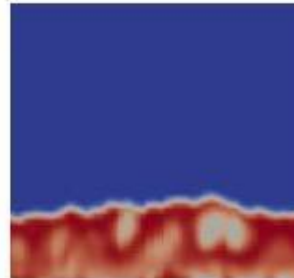
*b*



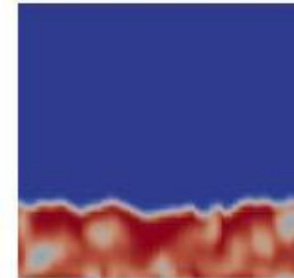
t=0 c



t=0,5 c



t=1 c



t=2 c

*c*

**Спасибо за внимание!**