

Institute of Theoretical and Mathematical Physics



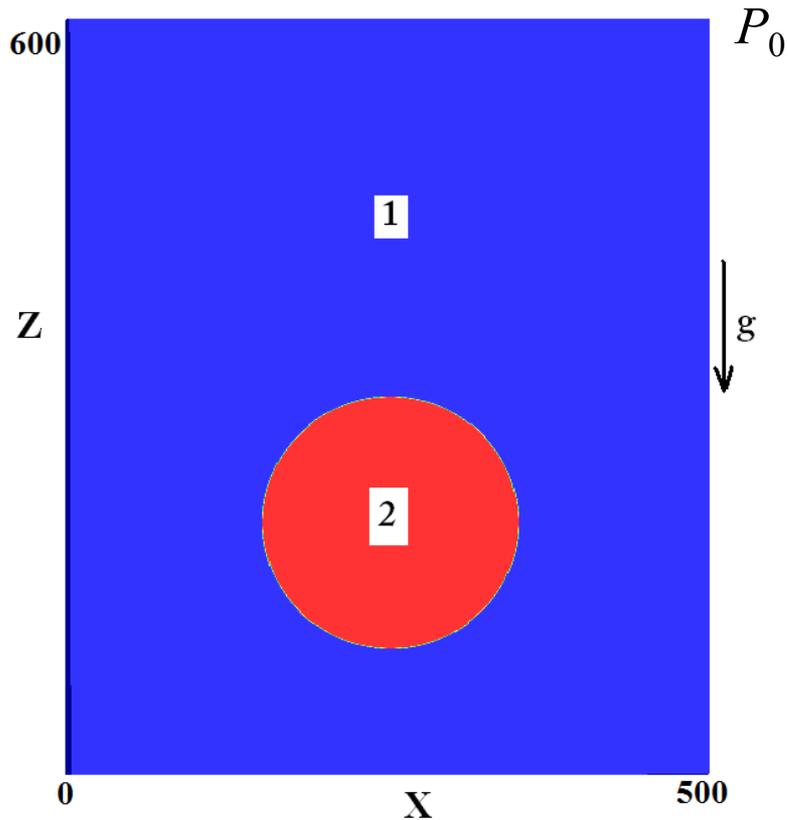
Russian Federal Nuclear Center -

VNIIEF

**3D численное моделирование образования
вихревого кольца при всплывании термика в
атмосфере**

Синькова О.Г., Стаценко В.П., Янилкин Ю.В.

Постановка задачи и 3D расчетов



$$\rho_1 = 1.25 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 0.125 \text{ кг/м}^3, \gamma = 1.4$$

$$R_2 = 100 \text{ м}, O_{\text{ЦЕНТР}} = (250, 250, 200)$$

$$z_v = 600 \text{ м}: P = P_0 - \rho_0 \cdot g \cdot (z_v - z) \quad (1)$$

$$P_0 = 1 \text{ атм} \quad g = 9.8 \text{ м/с}^2$$

$$\xi \equiv \frac{P_0}{\rho_1 g R_2} = 81.6 \text{ - степень несжимаемости}$$

$$Re = 4 * N_z$$

	$N_x * N_y * N_z$
Вариант 1	500*500*600 h=1
Вариант 2	1000*1000*1200 h=0.5

Немного истории

1. *Тарасов В.Ф.* О движении всплывающего вихревого кольца // Динамика сплошной среды, Новосибирск, вып.23, 1975. (эксперимент)
2. *Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Попов В.В., Рогачев В.Г., Толимяков А.И.* Образование вихревого кольца при всплывании большого воздушного пузыря в воде // ПМТФ, 1977, № 3. (эксперимент)
3. *Глаголева Ю.П., Жмайло В.А., Мальшаков В.Д., Нестеренко Л.В., Стаценко Софронов И.Д.* Образование кольцевого вихря при подъёме лёгкого газа в тяжёлом// ЧММСС, Новосибирск, 1974, т.5, N1 (**2D расчет начальной стадии**)
4. *Махвиладзе Г.М., Якуш С.Е.* Подъём турбулентного осесимметричного термика в неоднородной сжимаемой атмосфере // ПМТФ, 1989, № 1, с.62-68. (**2D расчет**)
5. *Чуприн И.А., Щербин М.Д.* Численное моделирование турбулентного термика // ПМТФ, 2003, т.44, № 3, с.64-75. (**2D расчет**)

Новизна нашей работы:

- 1) Проведено 3D численное моделирование задачи по коду ЭГАК.
- 2) Расчеты проведены до значительно больших моментов времени.
- 3) Расчеты проведены на существенно более мелкой сетке, что позволяет моделировать турбулентное перемешивание на неустойчивой границе облака.
- 4) Приведена теоретическая модель образования и движения вихревых колец в поле тяжести, не содержащая (в отличие от предыдущих моделей) каких-либо эмпирических коэффициентов, основанная на известных аналитических исследованиях круговых вихрей [6], [7].

6. *Valters J.K., and Davidson J.F.* The initial motion of a gas bubble formed in an inviscid liquid // *J. of Fluid Mech.*, 1963, v.17, part 3. (аналитические исследования)

7. *Ламб Г.* Гидродинамика, ОГИЗ – Гостехиздат, 1947г. (аналитические исследования)

Аналитическое решение задачи

Область интегрирования:



Полагаем:

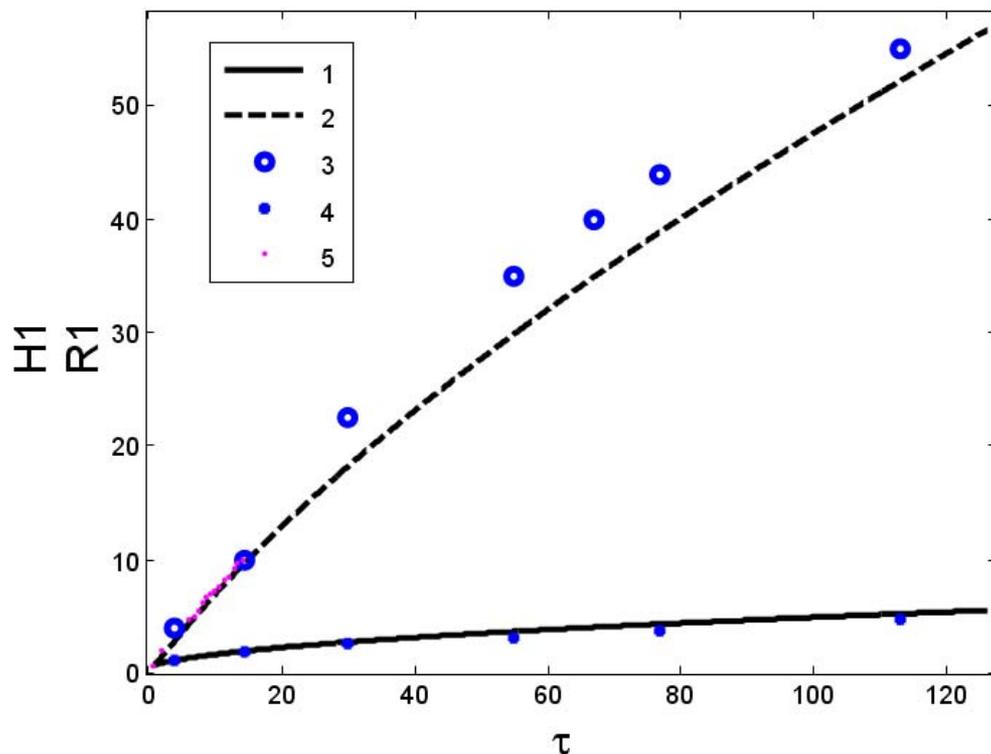
- что плотность в покоящемся сферическом объёме $\Omega_0 = \frac{4}{3}\pi \cdot R_0^3$ много меньше плотности окружающей среды ρ_a
- что завихрённость $\vec{\omega} = \text{rot}\vec{u}$ остается сосредоточенной на поверхности плавучего объема.
- что сечение вихревого кольца имеет правильную круговую форму радиусом $a_1 < R_1$

для скорости подъема получаем формулу:
$$U_1 = \frac{1}{\Gamma \cdot r_1^2} \cdot \left[\frac{T}{2\pi\rho_a} + \frac{3r_1\Gamma^2}{8\pi} \right], \text{ где } \Gamma = \int_{\Sigma} \vec{\omega} \cdot d\vec{\Sigma} \quad (1)$$

для радиуса получаем формулу:
$$R_1 = \sqrt{\frac{4}{3\Gamma_1} \cdot (\tau + u_{10})}, \text{ где } \Gamma_1 = \frac{\Gamma}{R_0 \cdot \sqrt{R_0 \cdot g}} \quad (2)$$

Далее используются безразмерные время и радиус:
$$\tau = \frac{t}{\sqrt{R_0/g}}, \quad R/R_0$$

Аналитическое решение в сравнении с экспериментом



высоты подъёма термика $H1$:

аналитика
измерения 1*
измерения 2*

●

...

радиус термика $R1$:

аналитика
измерения 1*

—

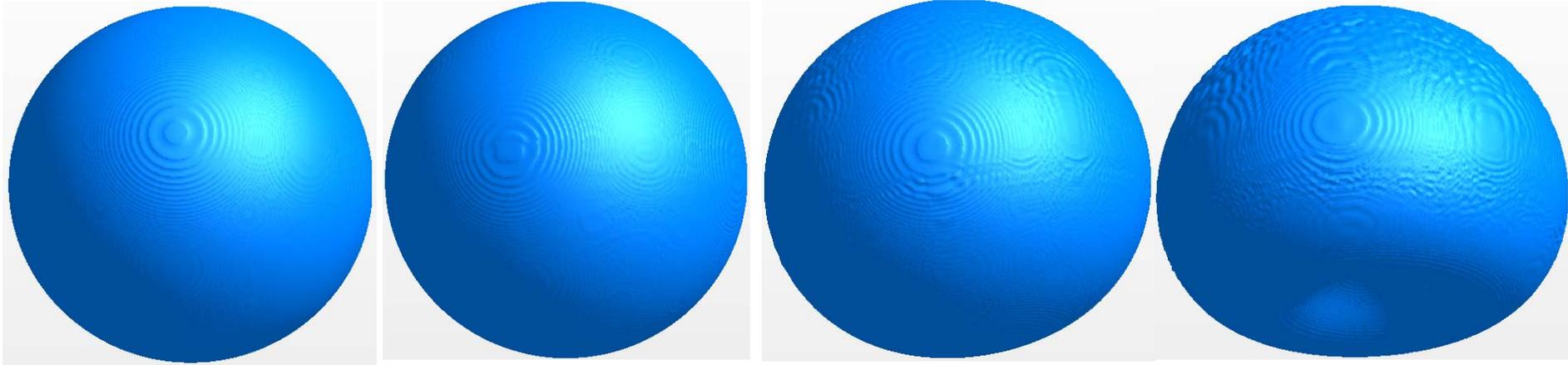
●

1* Тарасов В.Ф. О движении всплывающего вихревого кольца. 1975.

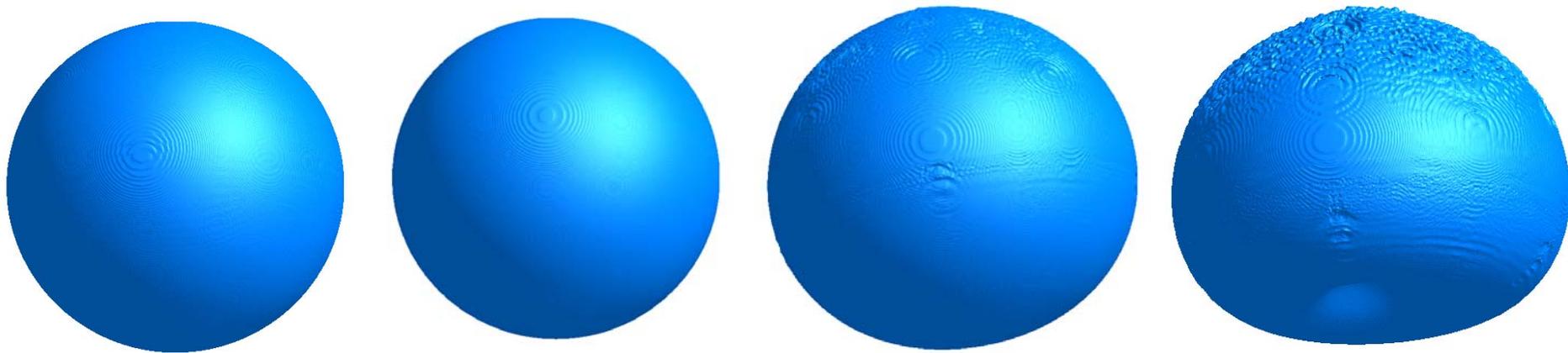
2* Жидов И.Г и др. Образование вихревого кольца при всплывании большого воздушного пузыря в воде. 1977.

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сбоку

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=0$

$\tau=0.313$

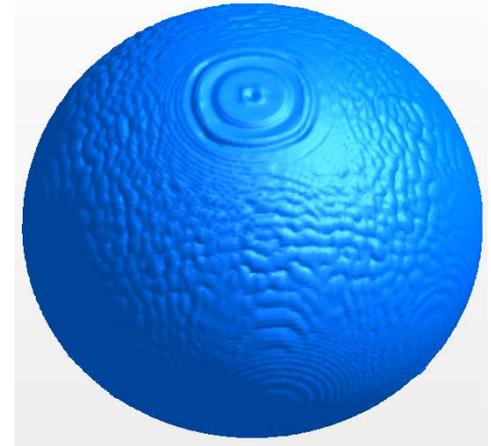
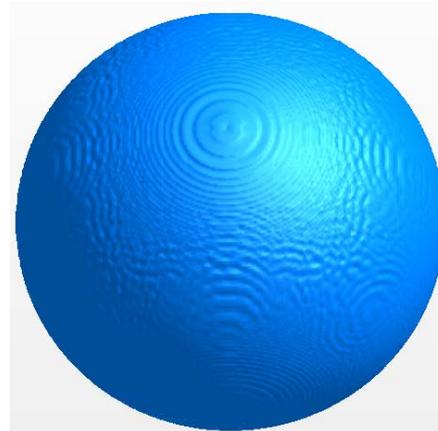
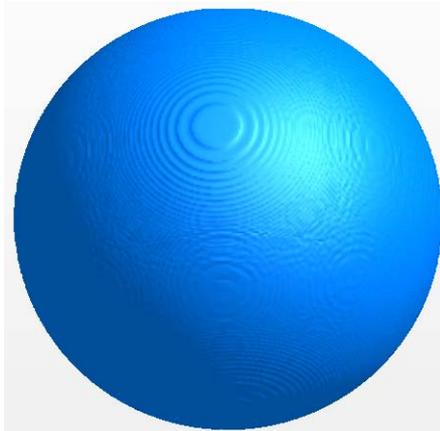
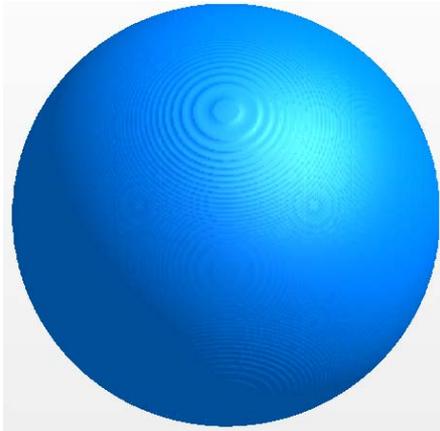
$\tau=0.626$

$\tau=0.939$

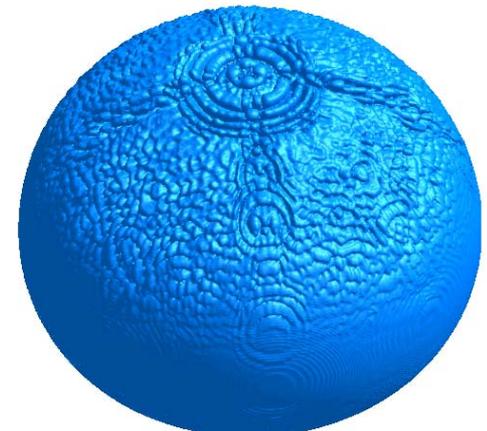
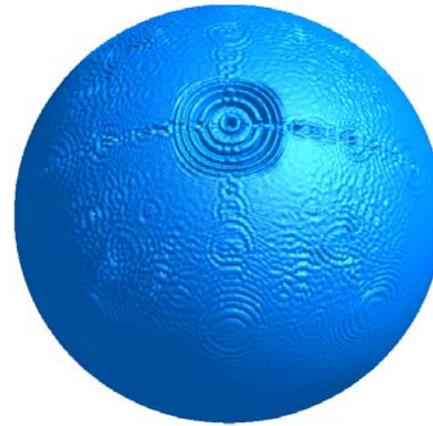
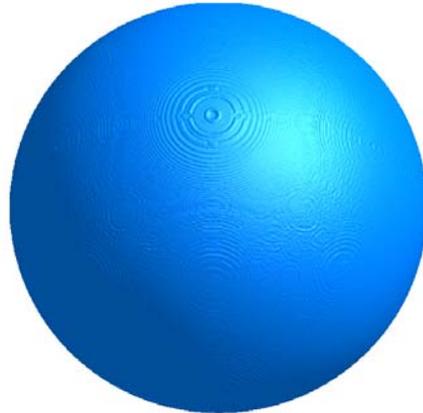
7

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сверху

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=0$

$\tau=0.313$

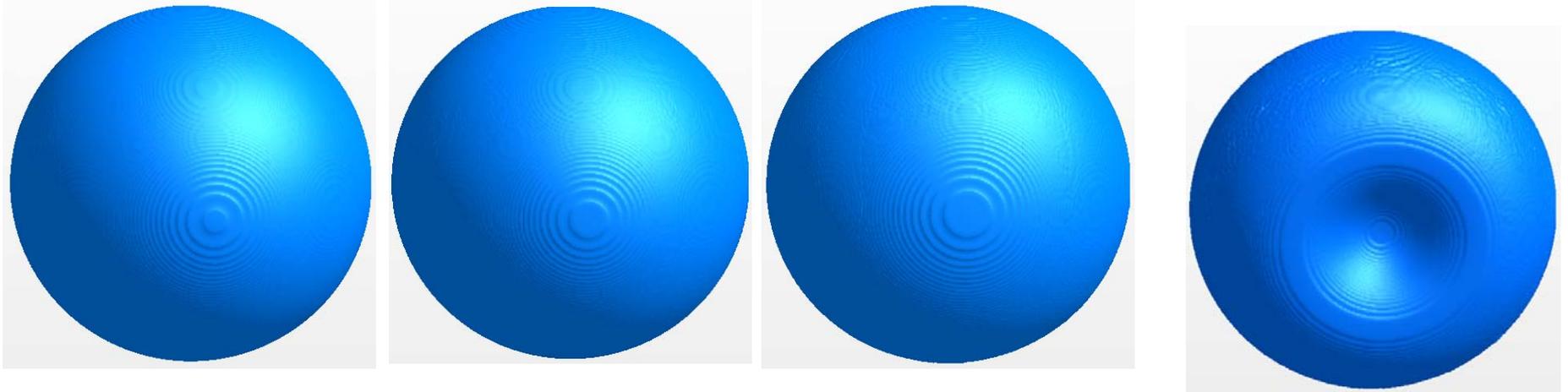
$\tau=0.626$

$\tau=0.939$

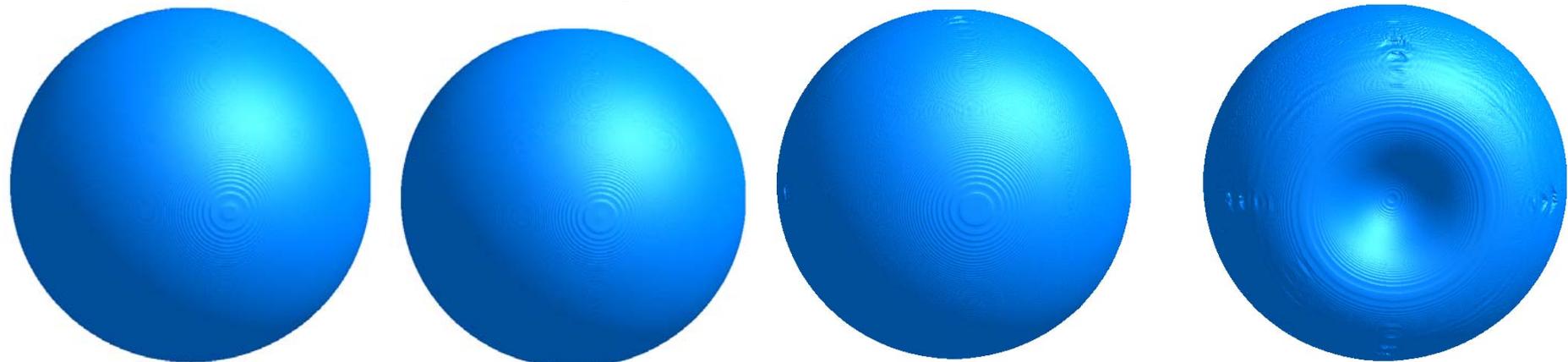
8

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид снизу

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=0$

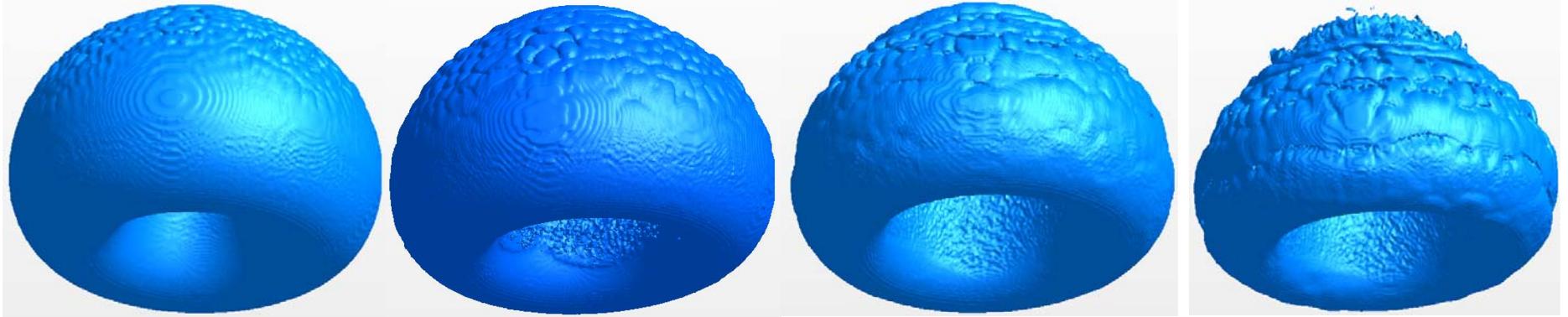
$\tau=0.313$

$\tau=0.626$

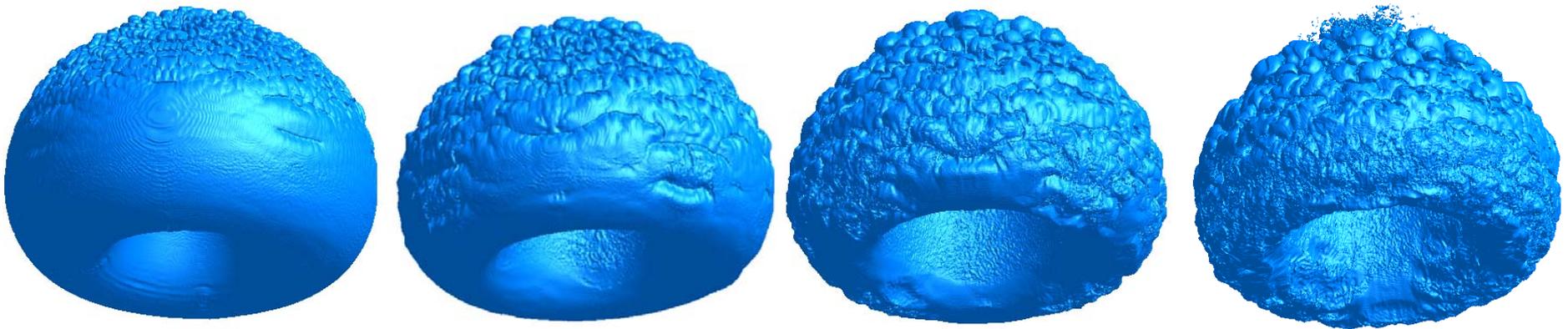
$\tau=0.939$

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сбоку

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=1.252$

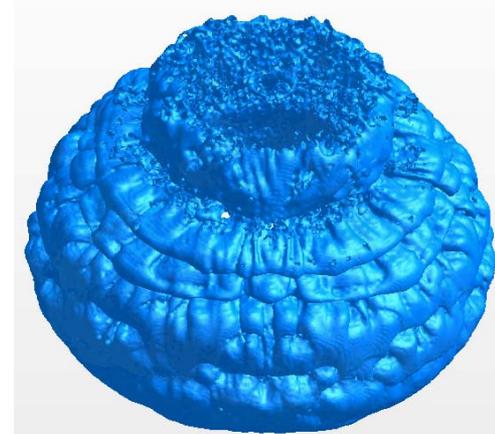
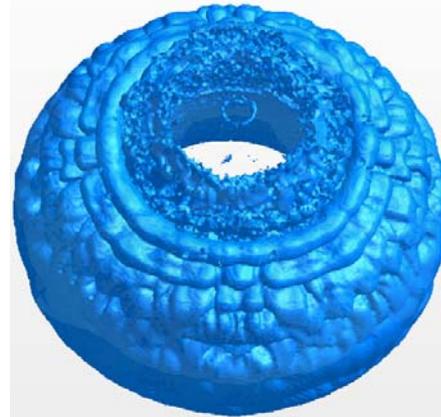
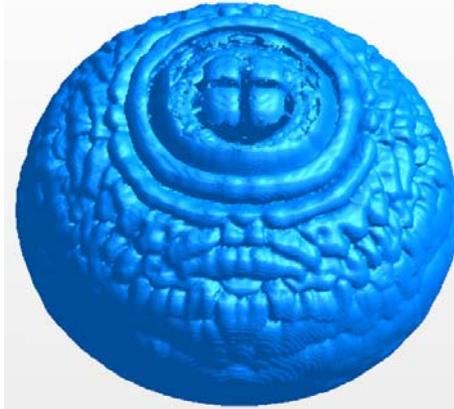
$\tau=1.565$

$\tau=1.88$

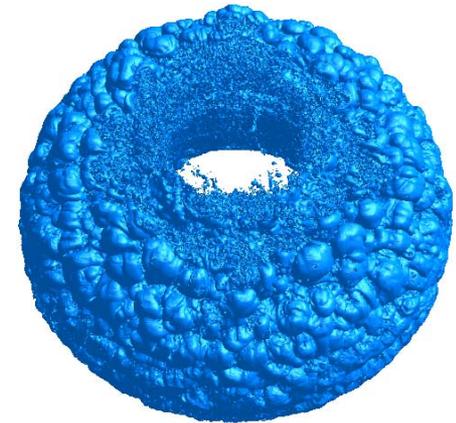
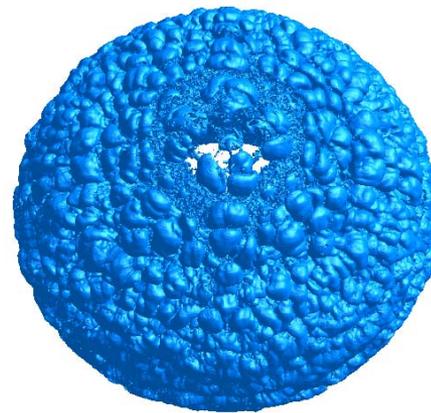
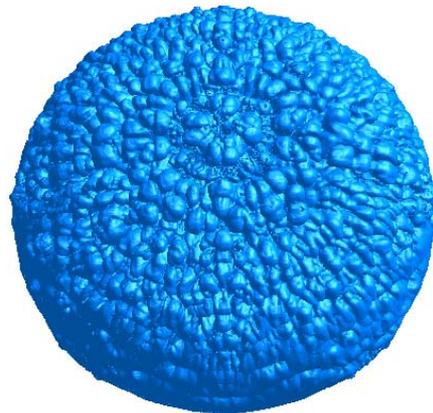
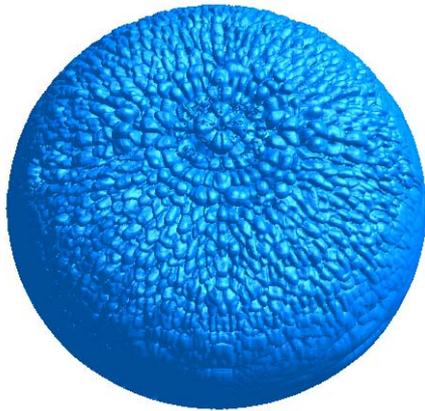
$\tau=2.19 \cdot 10^3$

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сверху

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=1.252$

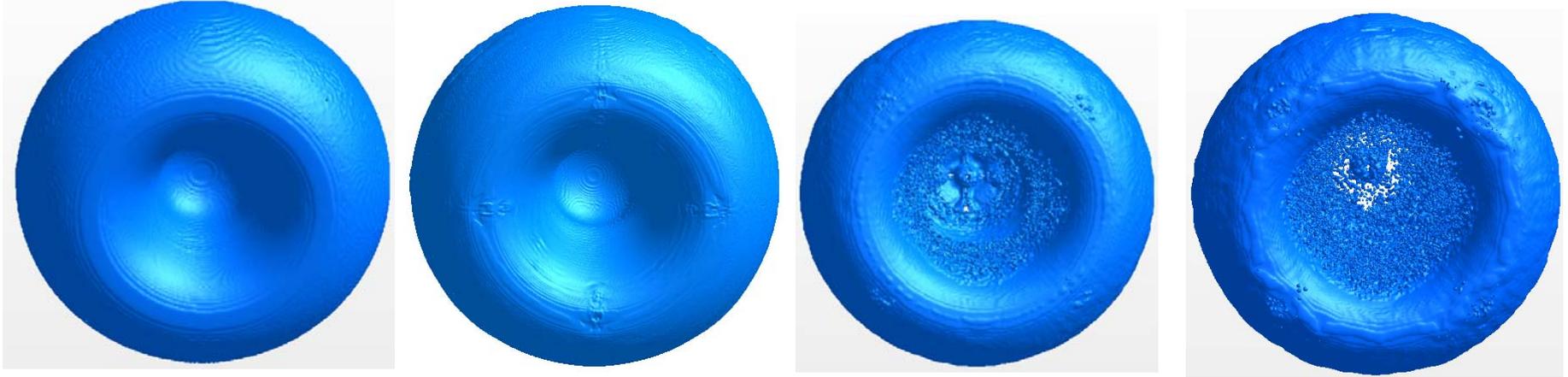
$\tau=1.565$

$\tau=1.88$

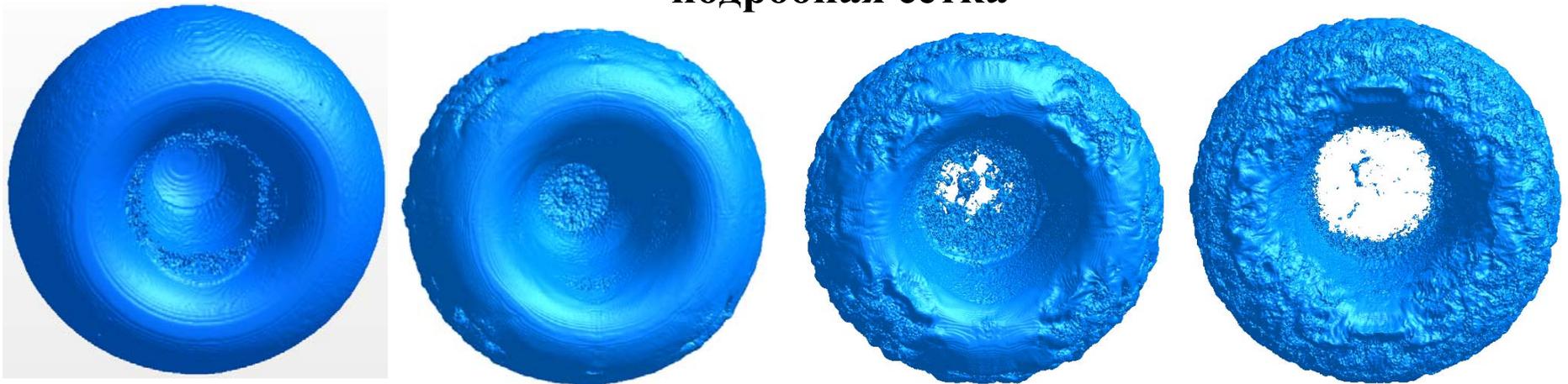
$\tau=2.19$ ¹¹

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид снизу

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=1.252$

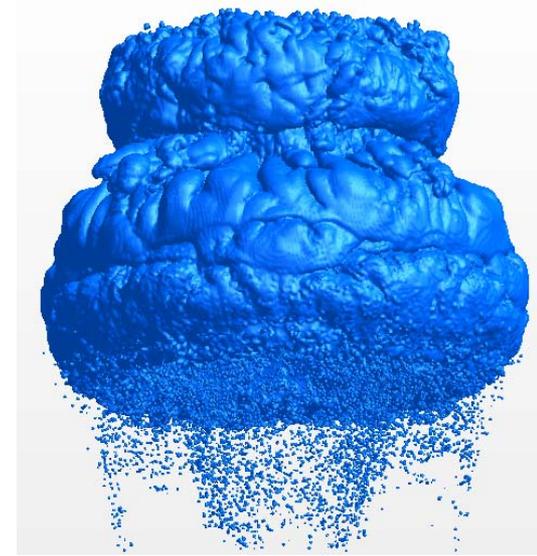
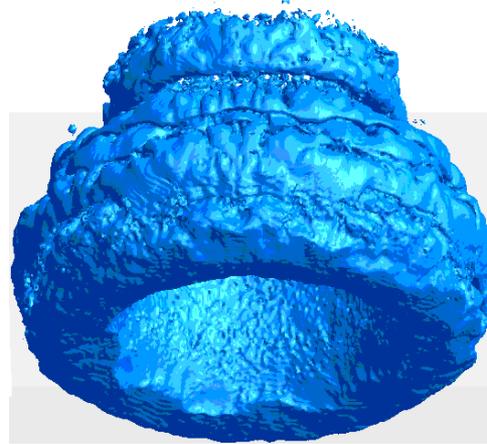
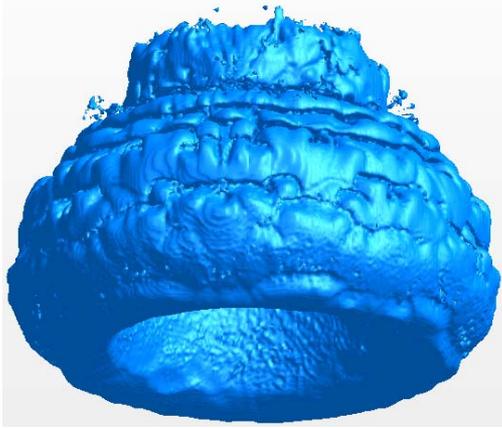
$\tau=1.565$

$\tau=1.88$

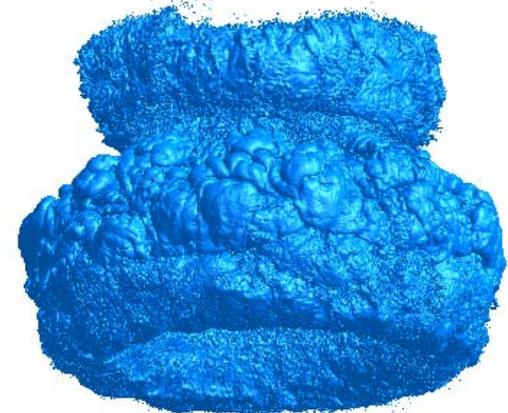
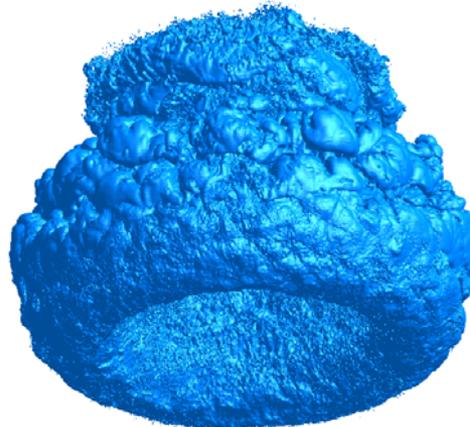
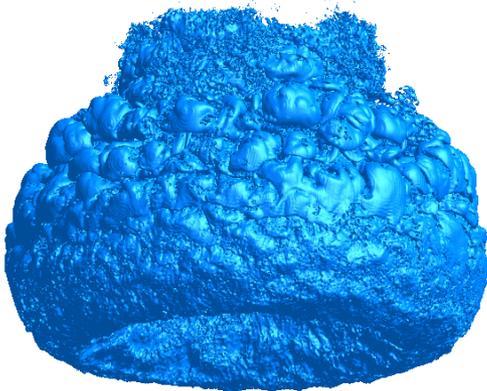
$\tau=2.19$ ¹²

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сбоку

грубая сетка



подробная сетка



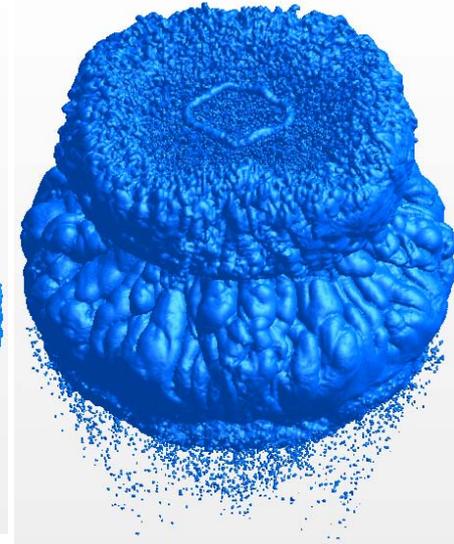
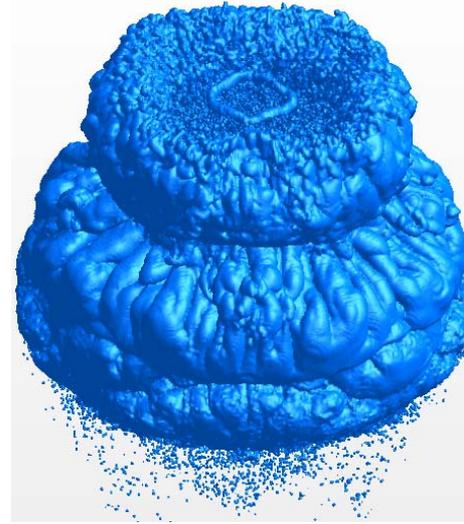
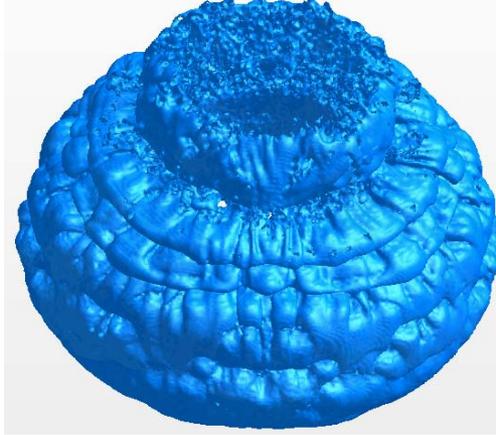
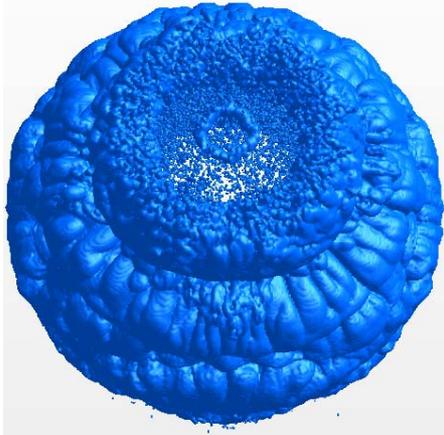
$\tau=2.5$

$\tau=2.82$

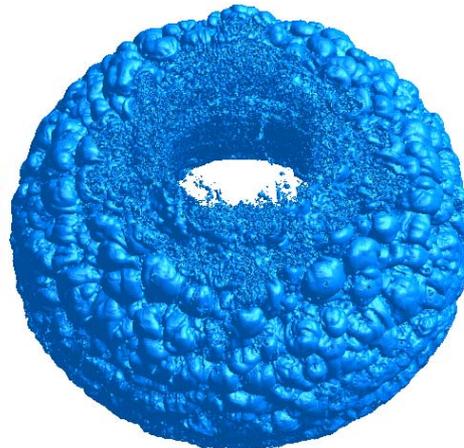
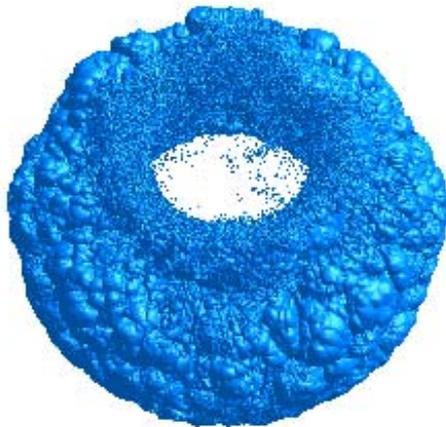
$\tau=3.13$

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид сверху

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=2.5$

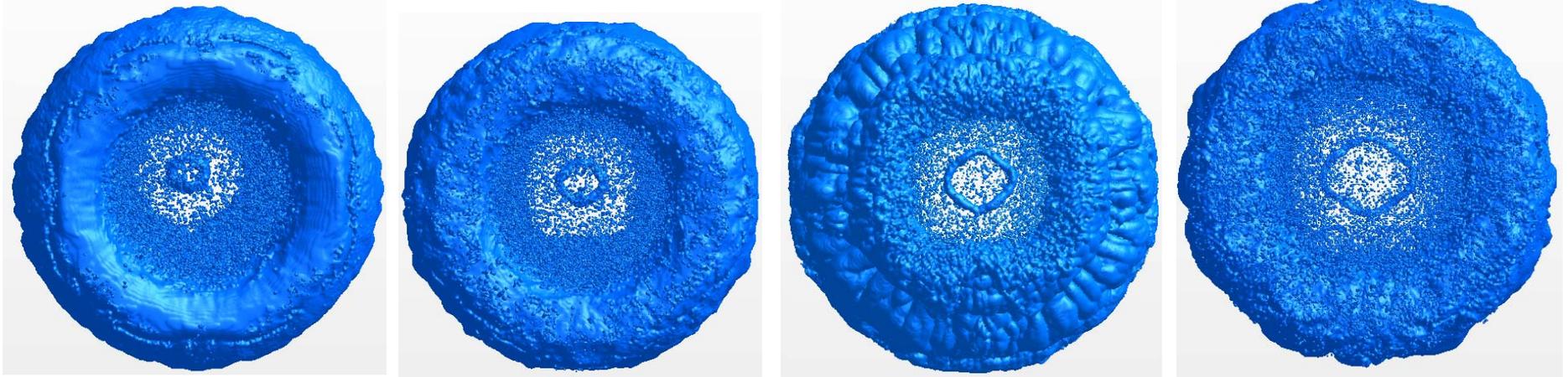
$\tau=2.82$

$\tau=3.13$

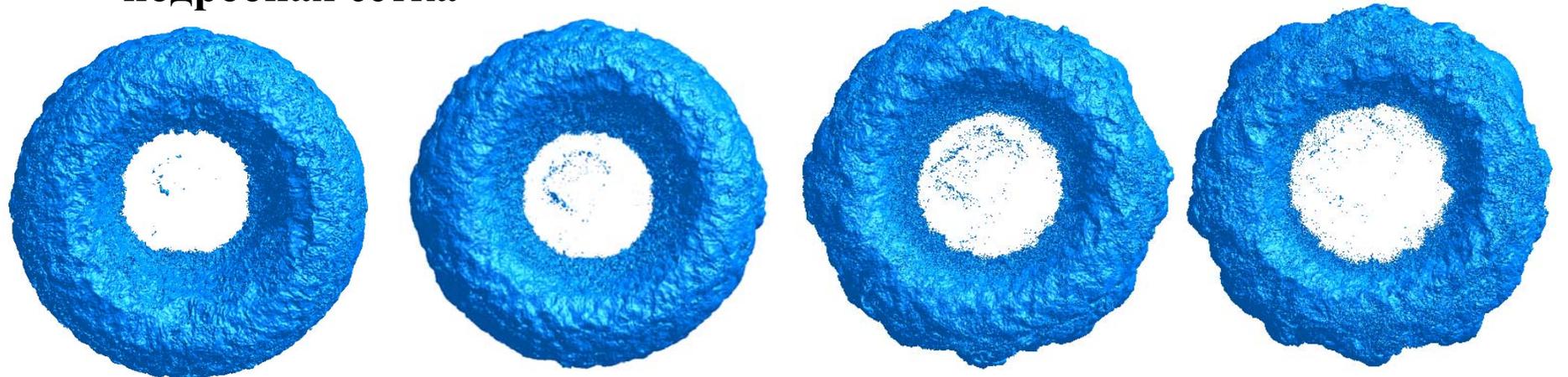
$\tau=3.49$

Изоповерхности объемной доли $\beta=0.5$ вещества термика, вид снизу

грубая сетка



подробная сетка



$\tau=2.5$

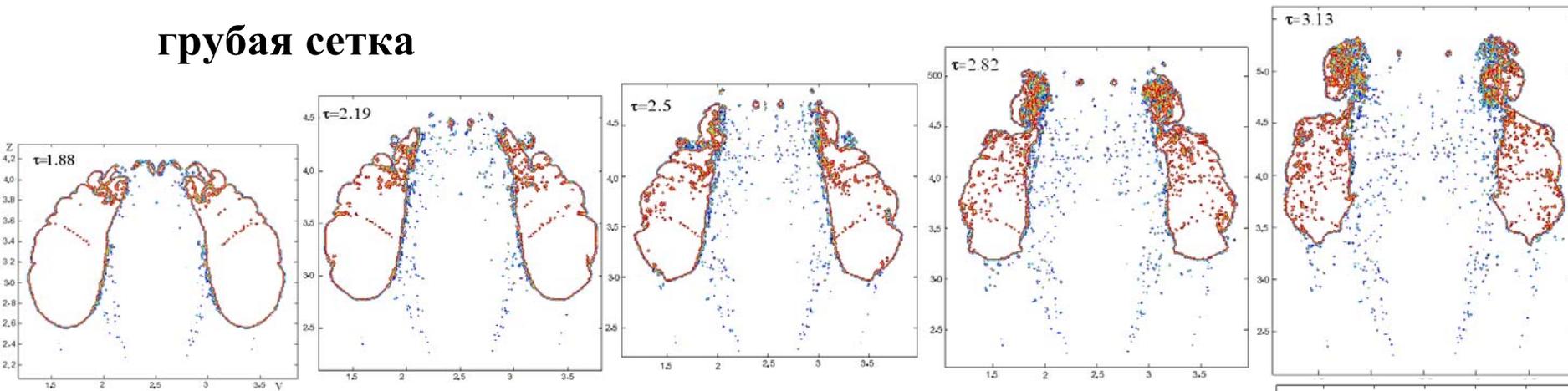
$\tau=2.82$

$\tau=3.13$

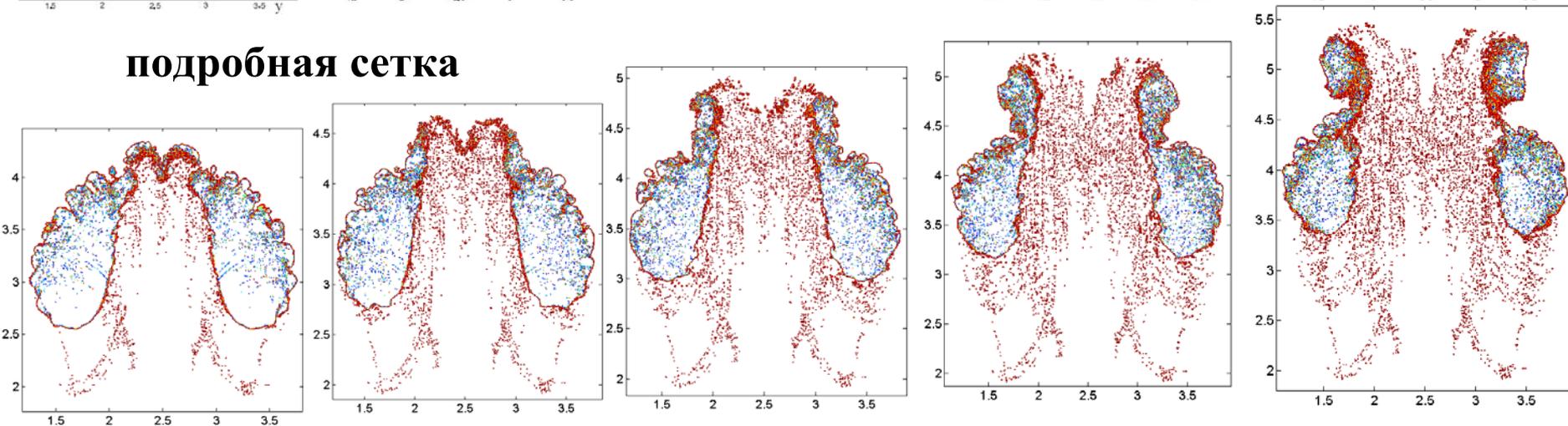
$\tau=3.44$

Двумерные сечения $x=0$

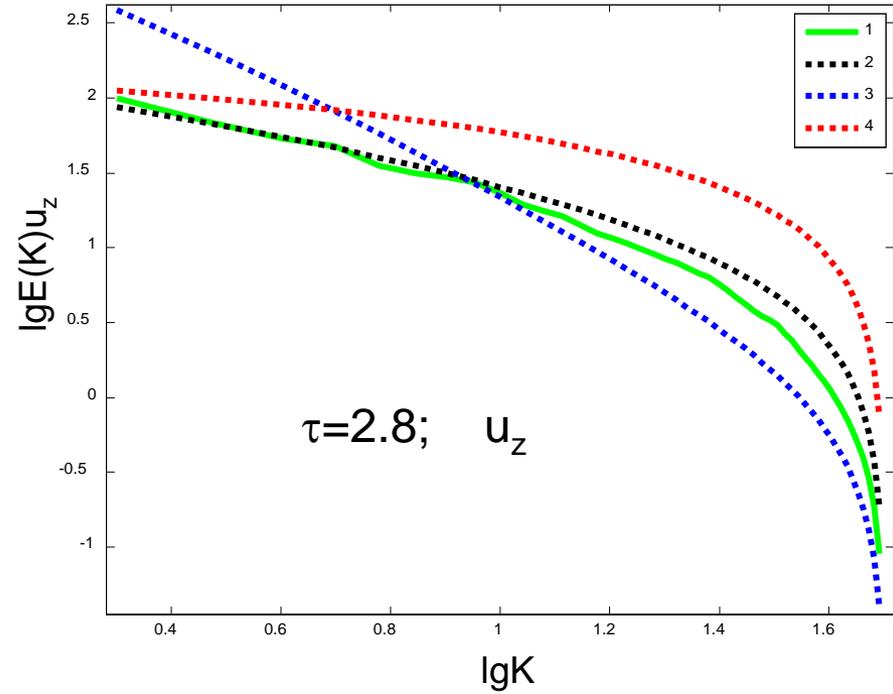
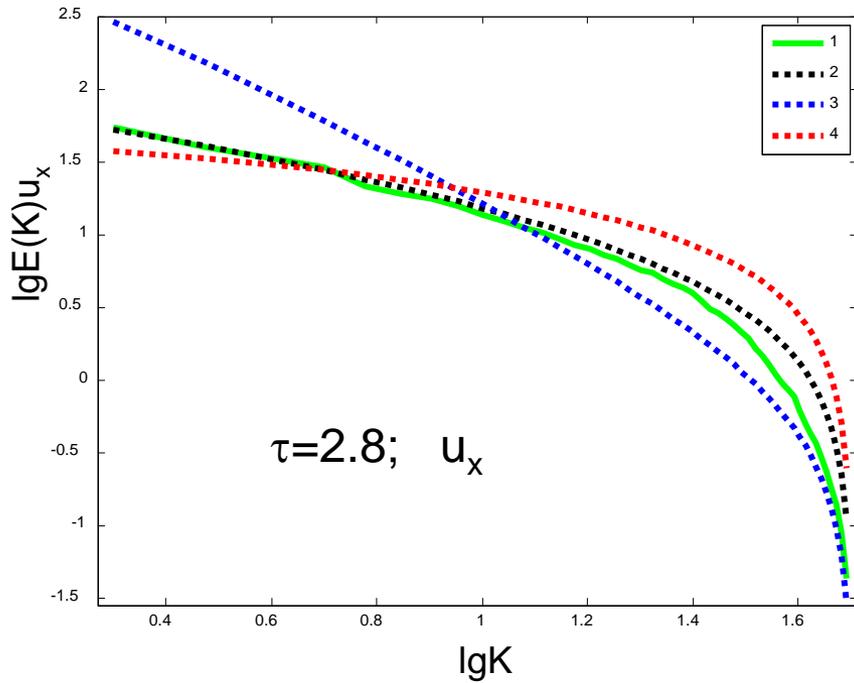
грубая сетка



подробная сетка



Энергетический спектр пульсаций величин u_x и u_z (подробная сетка)

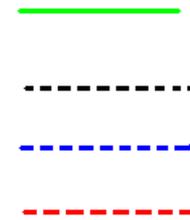


расчет 3D:

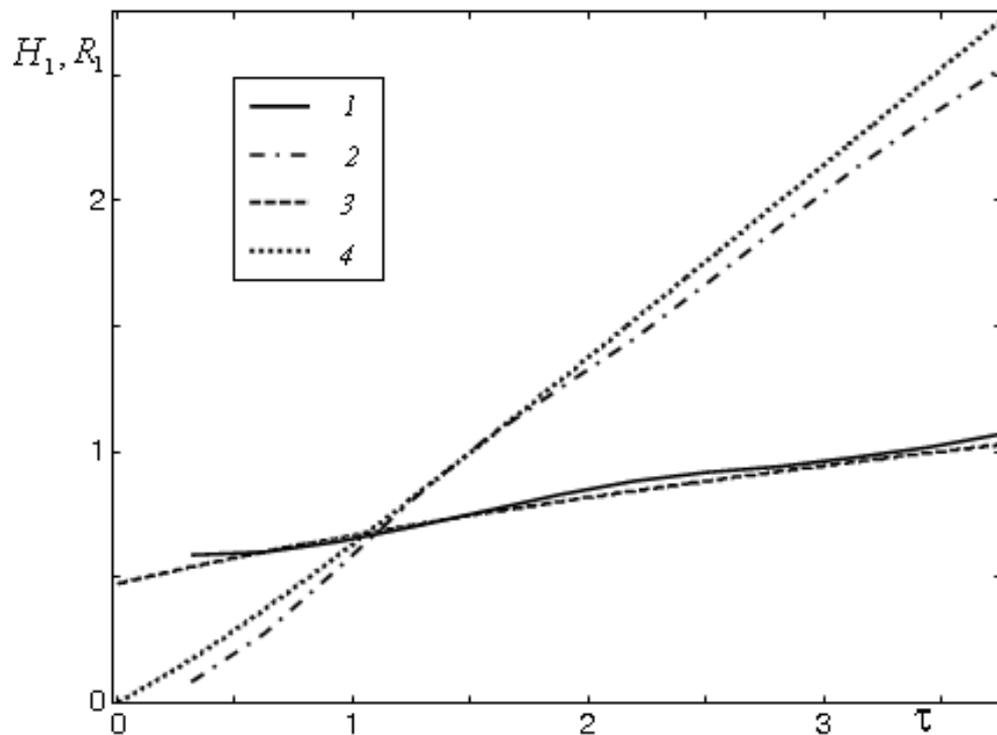
3D колмогоровский: $E(K)=\text{const} \cdot K^{-5/3}$

2D колмогоровский: $E(K)=\text{const} \cdot K^{-3}$

низкочастотный: $E(K)=\text{const} \cdot K^{-1}$



Сравнение расчета с аналитическим решением



высоты подъёма термика H_1 : расчет 2N (2) - · - - · - -
аналитика (4) ·····

диаграммы радиуса термика R_1 : расчет 2N (1) ———
аналитика (3) - - - - -

Заключение

- Выполнены 3D расчёты образования и движения вихревого кольца.
- Момент его образования оказывается близок к теоретически ожидаемому моменту, который также ранее был получен в 2D расчётах.
- 3D расчёты проведены до довольно поздней стадии. На этой стадии интегральные величины – высота подъёма и радиус вихревого кольца хорошо описываются аналитической моделью, которая, в свою очередь, согласуется с экспериментальными данными.
- Анализ турбулентности в вихревом кольце показал, что энергетический спектр пульсаций скорости турбулентности наиболее близко соответствует 3D колмогоровскому спектру.

Спасибо за внимание.