

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Математическая модель.....	7
1.1 Уравнение непрерывности и импульса.....	7
1.2 Кинетическая теория потока частиц.....	8
1.3 Межфазный обмен импульсами.....	11
2 Тестовая задача.....	13
2.1 Постановка задачи.....	13
2.2 Выбор решателя.....	15
2.3 Граничные и начальные условия.....	16
2.4 Постобработка.....	17
3 Модель вихревой трубы.....	21
3.1 Постановка задачи.....	21
3.2 Граничные и начальные условия.....	22
3.3 Постобработка.....	23
3.4 Модификация задачи.....	30
Заключение.....	33
Список литературы.....	34
Приложение А (справочное) Список решателей OpenFOAM.....	36

					<b>3952.103108.000 ПЗ</b>		
Изм		№ докум.	Подпись				
Разраб.		Шамаев				Лит.	Лист
Провер.		Михайленко					Листов
							5
							44
Н. Контр.		Ямилева				<b>ПМ-453</b>	
Утвердил		Федорова					

## ВВЕДЕНИЕ

Многофазные реакторы, где используется псевдооживленный слой приобретают все большее значение в современной химической промышленности, даже несмотря на то, что их гидродинамические характеристики сложны и еще не до конца изучены. Вычислительная гидродинамика (CFD) наибольшее подходящий инструмент для прогнозирования потоков в промышленных масштабах. Большая часть работы по моделированию псевдооживленных слоев сводится к визуальному сравнению моделируемых форм или размеров пузырьков, полученных в результате экспериментов. Численное моделирование обычно состоит из 3 этапов:

- 1) предварительная обработка,
- 2) решение дискретизированных уравнений,
- 3) постобработка.

Цель исследования – моделирование динамики газопылевой среды в канале вихревой трубы. Цель достигается путем решения следующих задач.

- 1) Подготовка математической модели динамики дисперсной среды в потоке несущего сжимаемого флюида на основе основных положений механики сплошной среды.
- 2) Изучение стандартных решателей OpenFOAM для моделирования динамики многофазных сред
- 3) Построение вычислительной сетки модели канала вихревой трубы для исследуемых процессов.
- 4) Проведение тестовых расчетов.
- 5) Подведение итогов исследования.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

## 1.1 УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ И ИМПУЛЬСА

Уравнение непрерывности, или баланс массы для фазы  $i$  (газообразной или твердой), гласит:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i v_i) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha_g + \alpha_s = 1, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – объемная доля каждой фазы,  $v$  – скорость, а  $\rho$  – плотность.

Массообмен между фазами, например, в результате реакции или горения, не учитывается.

Баланс импульса для газовой фазы определяется уравнением Навье–Стокса, модифицированным для включения члена межфазной передачи импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g v_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g v_g v_g) = \nabla \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g g - \alpha_g \nabla P - \beta(v_g - v_s), \quad (3)$$

где  $\bar{\tau}$  – тензор вязких напряжений,  $g$  – ускорение свободного падения,  $P$  – термодинамическое давление, а  $\beta$  – коэффициент межфазной передачи импульса.

Приведен баланс импульса фазы твердых частиц:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s v_s) = \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s g - \alpha_s \nabla P - \nabla P_s^* + \beta(v_g - v_s), \quad (4)$$

где  $P_s^*$  – давление твердых частиц, полученное из кинетической теории гранулированного потока.

Оба тензора, вязкость при сдвиге и объемная вязкость, используются в тензоре вязких напряжений.

## 1.2 КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПОТОКА ЧАСТИЦ

Эквивалентная термодинамической температуре газов, температура гранул введена в качестве меры энергии колебаний скорости частиц. Температура гранул определяется как

$$\Theta_s = \frac{1}{3} v'^2, \quad (5)$$

где  $\Theta_s$  – температура гранул, а  $v'$  – скорость колебания частиц.

Уравнение сохранения флуктуирующей энергии твердых тел:

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \Theta_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \Theta_s) v_s \right] = (-\nabla P_s^* \bar{I} + \bar{t}_s) : \nabla v + \nabla (k_\Theta \nabla \Theta_s) - y_\Theta + \Phi_\Theta, \quad (6)$$

где  $k_\Theta$  – коэффициент диффузии,  $y_\Theta$  – рассеяние флуктуирующей энергии,  $\Phi_\Theta$  – обмен флуктуирующей энергией между фазами.

Рассеяние флуктуирующей энергии:

$$y_\Theta = 3(1 - e^2) \alpha_s^2 \rho_s g_0 \Theta_s \left( \frac{4}{d_s} \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} - \nabla v_s \right), \quad (7)$$

где  $g_0$  – функция радиального распределения,  $e$  – коэффициент восстановления сталкивающихся частиц,  $d_s$  – диаметр частиц.

Давление твердых частиц представляет собой нормальные силы в твердой фазе, обусловленные взаимодействием частиц. Его описание, основанное на кинетической теории гранулированного потока, было разработано Дженкинсом и Сэвиджем [1], Луном и др. [2]. При таком подходе учитываются как кинетические, так и ударные воздействия. Кинетическая часть описывает влияние перемещения частиц, в то время как термин "столкновение" учитывает передачу импульса при прямых столкновениях. Используем давление твердых частиц, указанное Луном и др. [2]:

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P_s^* = \alpha_s \rho_s \Theta_s (1 + 2g_0 \alpha_s (1 + e)) \quad (8)$$

Объемная вязкость – это показатель сопротивления жидкости сжатию. Очевидно, что важность объемной вязкости сильно зависит от градиентов скорости. В псевдооживленном слое объемная вязкость и вязкость при сдвиге имеют одинаковый порядок величины, и, следовательно, объемной вязкостью не следует пренебрегать, как это делается при моделировании ньютоновских жидкостей. В этой работе используется уравнение Луна и др. [2]:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}}, \quad (9)$$

где  $\lambda_s$  – объемная вязкость твердой фазы.

В то время как давление и объемная вязкость описывают нормальные силы, вязкость сдвига учитывает тангенциальные силы. Возможно комбинировать различные межчастичные силы и использовать баланс импульса, аналогичный балансу истинной непрерывной жидкости. Аналогично давлению твердых частиц, а вязкость твердой фазы может быть получена из кинетической теории. Вязкость при сдвиге складывается из двух слагаемых: одного слагаемого для разбавленной области и одного слагаемого для плотной области. В литературе можно найти различные выражения для вязкости твердых тел при сдвиге. Используем подход Гидаспова [3]:

$$\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} + \frac{2^{5\sqrt{\pi}} \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s}}{(1+e) \alpha_s g_0} * \left[ 1 + \frac{4}{5} g_0 \alpha_s (1 + e) \right]^2, \quad (10)$$

где  $\mu_s$  – вязкость при сдвиге твердой фазы.

В областях с экстремальной плотностью слоя ( $\varepsilon_s \approx \varepsilon_{s,max}$ ) преобладают напряжения частиц из-за трения между частицами, а не из-за столкновений и

колеблющееся движение. Двумерный тензор напряжений для гранулированного материала, предложен Соколовским [4] и Джексоном [5].

$$\mu_s = \frac{P_s^* \sin \phi}{\alpha_s \sqrt{\frac{1}{6} \left( \left( \frac{\partial u_s}{\partial x} - \frac{\partial v_s}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_s}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_s}{\partial x} \right)^2 \right) \dots \frac{1}{4} \left( \frac{\partial u_s}{\partial y} + \frac{\partial v_s}{\partial x} \right)^2}}, \quad (11)$$

где  $\phi$  – угол внутреннего трения,  $u$  и  $v$  – компоненты скорости, а  $x$  и  $y$  – декартовы направления  $u$  и  $v$ .

Функция радиального распределения, используемая в приведенных выше уравнениях, представляет собой равновесное радиальное распределение при контакте частиц, полученное из статистической механики. Это можно рассматривать как меру вероятности контакта между частицами. Используем уравнение Динга и Гидаспова [6]:

$$g_0 = \frac{3}{5} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{s,max}$  – максимальная концентрация твердых частиц.

Вместо решения уравнения (6) для полного баланса флуктуирующей энергии твердых тел Шьямламом и др. было предложено алгебраическое выражение [7]. Этот подход предполагает, что гранулированная энергия рассеивается локально, пренебрегая конвекцией и диффузией и сохраняя только условия генерации и рассеяния, что приводит к формуле

$$0 = (-P_s^* \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s - y_\Theta \quad (13)$$

Этот подход справедлив только при условии, что объемная доля твердой фазы остается высокой, а скорость движения твердой фазы остается относительно низкой. В этом режиме большая часть гранулированной энергии рассеивается

локально, и мало что остается для утечек. Уравнение (13) затем можно переписать в виде:

$$\Theta_s = \left( \frac{-(K_1 \alpha_s + \rho_s) \text{tr}(\bar{\bar{D}}_s)}{1*} \dots \frac{+ \sqrt{(K_1 \alpha_s + \rho_s)^2 \text{tr}^2(\bar{\bar{D}}_s) + 4K_4 \dots [2K_3 \text{tr}(\bar{\bar{D}}_s^2) + K_2 \text{tr}^2(\bar{\bar{D}}_s)]}}{2\alpha_s K_4} \right), \quad (14)$$

где  $\bar{\bar{D}}_s$  – тензор скорости деформации твердых тел, и с сокращениями:

$$K_1 = 2(1 + e)\rho_s g_0 \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \rho_s d_s (1 + e) \alpha_s g_0 - \frac{2}{3} K_3 \quad (16)$$

$$K_3 = \frac{\rho_s d_s}{2} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{3(3-e)} \dots \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e)(3e - 1) \alpha_s g_0 \right] + \frac{8\alpha_s}{5\sqrt{\pi}} g_0 (1 + e) \right) \quad (17)$$

$$K_4 = \frac{12(1-e^2)\rho_s g_0}{d_s \sqrt{\pi}} \quad (18)$$

При использовании этого алгебраического уравнения вместо решения баланса для температуры гранул во время моделирования достигается гораздо более быстрая сходимость. Бемером и др. было показано, что использование этого подхода практически не влияет на температуру гранул в режиме образования пузырьков [8].

### 1.3 МЕЖФАЗНЫЙ ОБМЕН ИМПУЛЬСАМИ

Используется функция межфазного сопротивления, предложенная Шьямлалом и др. [7]. Эта функция перетаскивания основана на работах Ричардсона и Заки [9], Даллы Валле [10], Гарсайда и Аль-Дибунни [11]:

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{v_r^2 d_s} \cdot |v_g - v_s|, \quad (19)$$

где

$$C_D = \left( 0.63 + 4.8 \sqrt{\frac{v_r}{Re}} \right)^2 \quad (20)$$

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$V_r = 0.5(a - 0.06Re + \sqrt{(0.06Re)^2 + 0.12Re(2b - a) + a^2}) \quad (21)$$

$$a = \alpha_g^{4.14} \quad (22)$$

$$b = \begin{cases} 0.8\alpha_g^{1.28} & \text{if } \alpha_s \geq 0.15 \\ \alpha_g^{2.65} & \text{if } \alpha_s < 0.15 \end{cases} \quad (23)$$

$$Re = \frac{d_s \rho_g |v_g - v_s|}{\mu_g}, \quad (24)$$

где  $C_D$  – коэффициент лобового сопротивления,  $V_r$  – отношение конечной скорости группы частиц к скорости изолированной частицы,  $Re$  – число Рейнольдса частицы, а  $\mu_g$  – вязкость газа.

Этот подход допустим только в том случае, если распределение частиц по размеру ячеек сетки при моделировании можно считать однородным. Размер ячеек сетки при многофазном моделировании составляет величину порядка одного квадратного сантиметра – особенно в системах, где концентрация твердых частиц с каждым числом невелика, например, в значительной степени колеблется по сравнению с общим количеством частиц, и такой подход может дать неверные результаты.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

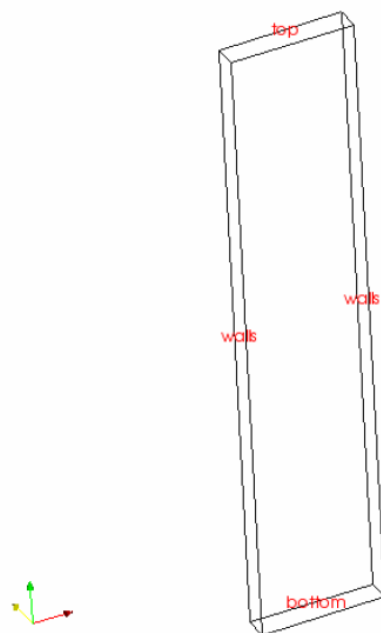


## 2 ТЕСТОВАЯ ЗАДАЧА

### 2.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделирование будет проводиться на Linux Fedora средствами OpenFOAM. Перед тем как моделировать динамику несомой дисперсной среды вихревой трубы, необходимо выбрать решатель, с помощью которого мы будем реализовывать моделирование и протестировать его на тестовой задаче.

Для этого построим геометрию колонну изготовленного из цельного блока размером  $0,15 \times 0,01 \times 1$  м, в соответствии с рисунком 1. Колонна с псевдооживленным слоем заполняется частицами диаметром 30, 300, 3000 микрометров и снизу вдувается воздух с постоянной скоростью 0,25 м/с.



После составления геометрии перейдем к генерации сетки. С помощью утилиты BlockMesh опишем все опорные вершины сетки, на которых будут строиться все блоки для сетки. Каждый блок состоит из 8 вершин, тип и список коэффициентов расширения ячеек в каждом направлении. После того как описали

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

все блок сетки, необходимо описать грани в модели. Для этого каждая грань разбивается на участки, где каждый участок имеет свое название в качестве ключевого слова. Каждая грань блока определяется списком из 4 вершин. Порядок, в котором задаются вершины, должен быть таким, чтобы при взгляде изнутри блока и начиная с любой вершины, грань должна быть пройдена по часовой стрелке для определения других вершин.

После того как описаны все грани проверим правильность построения, запустив утилиту ParaFOAM. ParaFOAM – это скрипт для визуализации, который запускает ParaView, являющееся основным средством последующей обработки.

В соответствии с рисунком 2 видно, что смоделированная модель колонны построена в соответствии с геометрией сетки.

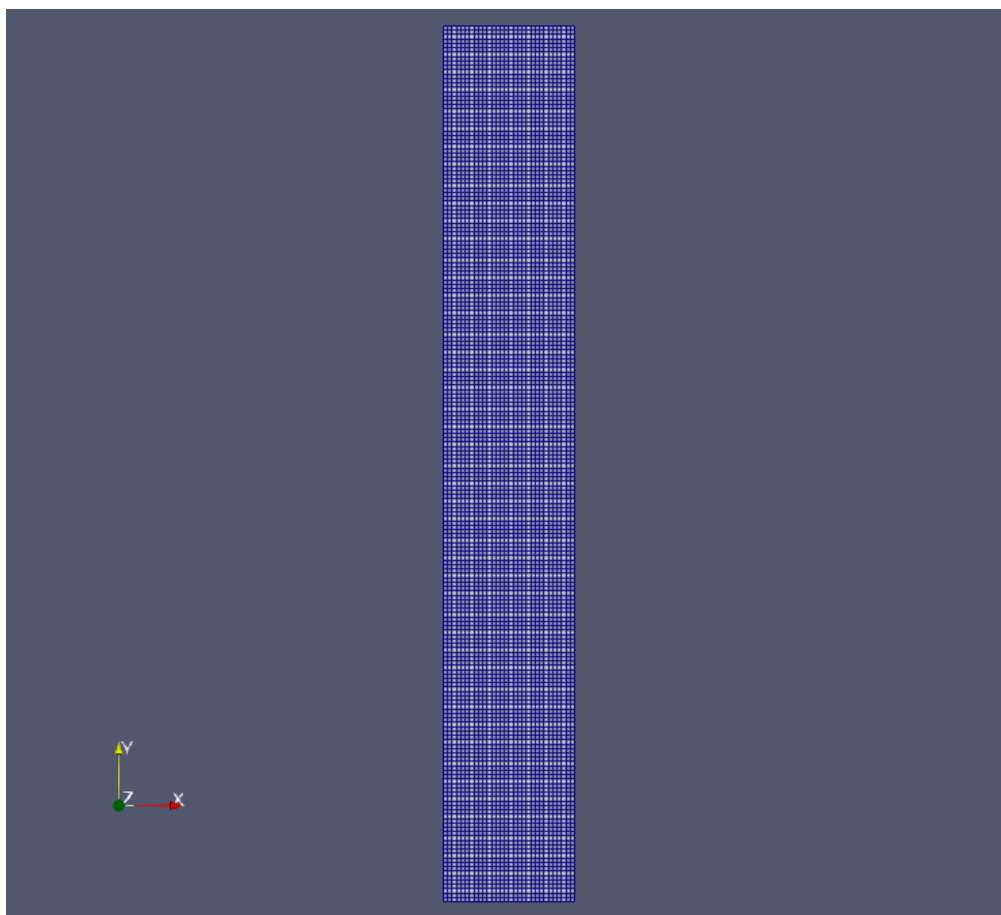


Рисунок 2 – Модель колонны

В таблице 1 приведен список значений параметров модели, используемых при моделировании.

Таблица 1 – Список значений параметров модели, используемых при моделировании

Символ	Описание	Значение
$\rho_s$	плотность частиц	2600 кг м <sup>-3</sup>
$\rho_g$	плотность газа	1.28 кг м <sup>-3</sup>
$d_s$	диаметр частиц	3–е3, 3–е4, 3–е5 м
$e$	коэффициент возмещения	0.6
$\alpha_{max}$	максимальная упаковка частиц	0.61
$\phi$	угол внутреннего трения	25°
$\Theta_s$	температура частиц	10 <sup>-5</sup> – 0.1 м <sup>2</sup> с <sup>-2</sup>
$\Delta t$	шаг по времени	0.0002

## 2.2 ВЫБОР РЕШАТЕЛЯ

Перед тем как переходить к расчетам, необходимо выбрать подходящий решатель, способный предоставить корректные расчеты, в соответствии с поставленной задачей. В OpenFOAM нет универсального решателя, применимого ко всем случаям. Для нашего случая выберем решатель, для многофазного потока. В приложении А приведен список решателей для многофазного потока в OpenFOAM.

Из всего многообразия решателей, существующих в OpenFOAM, наиболее подходящим является – twoPhaseEulerFoam, потому что он разработан для системы из двух сжимаемых фаз, одна из которых является дисперсной. Обе фазы описываются с использованием уравнений сохранения Эйлера. При таком подходе каждая из фаз рассматривается как непрерывная среда. В данном случае моделируется псевдооживленный слой. Существуют варианты изменения физических свойств двух фаз, а также указания того, какая жидкость является дискретной фазой из двух фаз.

## 2.3 ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

После того как был выбран решатель и построена сетка, необходимо описать начальные и граничные условия системы. В таблице 2 приведены граничные и начальные условия на стенках для различных переменных.

Таблица 2 – Начальные и граничные условия

Переменная	Начальные и граничные условия
alpha	Равномерное внутреннее поле 0.33, нулевой градиент на стенках
p	Внутреннее поле однородно и равно 0, нулевой градиент на стенках
Ua	Равномерное внутреннее поле равно 0, равномерное фиксированное значение стен ( 0 0 0)
Ub	Внутреннее поле однородно и равно 0, стены с фиксированным значением однородны ( 0 0 0)
Theta	Внутреннее поле однородно и равно 0, нулевой градиент на стенках
k	Равномерное внутреннее поле равно 1, нулевая градиентность на стенах
epsilon	Равномерное внутреннее поле равно 10, нулевая градиентность на стенах
alpha	Равномерное внутреннее поле 0.33, нулевой градиент на стенках

Другими словами, в системе действует условие прилипания на стенках, постоянная скорость на входе, условие постоянного давления на выходе. Нулевая градиентность предполагает, что производная по нормали равно нулю, то есть действует условия протекания. На скорость действует условие прилипания.

## 2.4 ПОСТОБРАБОТКА

После того как были описаны граничные и начальные условия системы, сгенерирована сетка и выбран решатель перейдем к расчетам. Запустим решатель и после завершения расчетов запустим скрип ParaFOAM для визуализации получившихся расчетов.

Рассмотрим температуру гранул в начальный и конечный моменты времени. На рисунках 3 и 4 видно, какую температуру имеют частицы в начальный и конечный моменты времени соответственно при различных диаметрах.

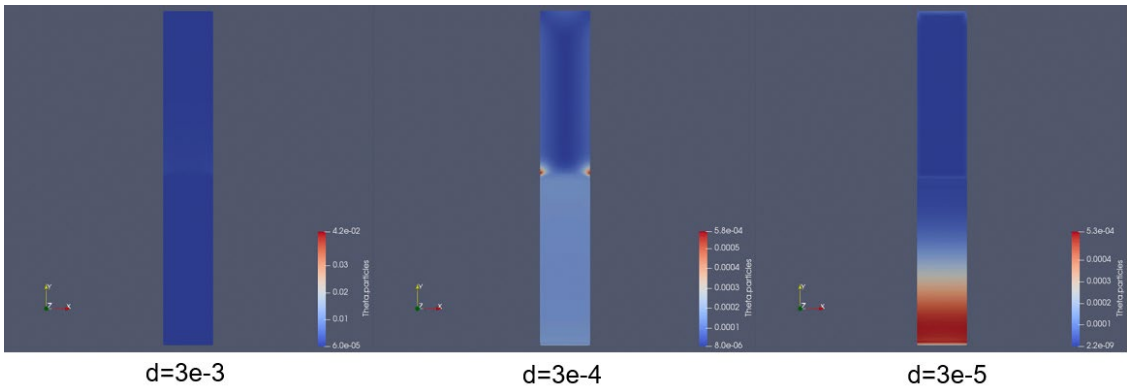


Рисунок 3 – Температура частиц при различных диаметрах в начальный момент времени

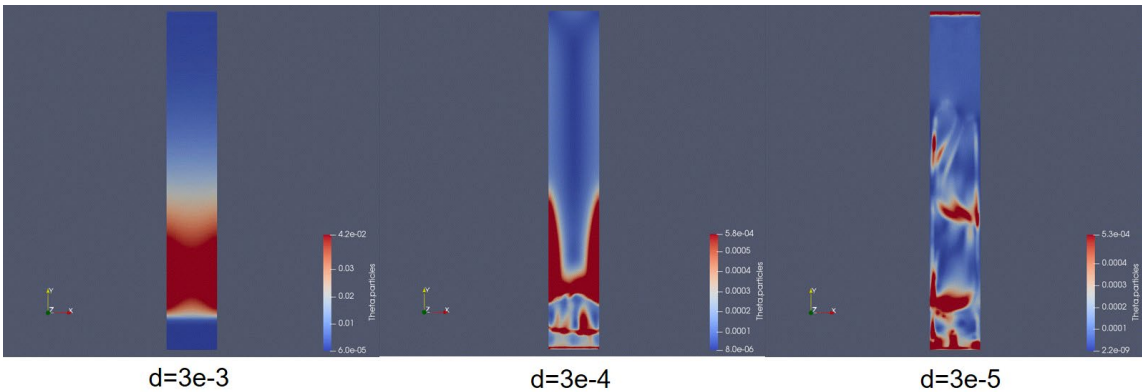


Рисунок 4 – Температура частиц при различных диаметрах колонны в конечный момент времени

Рассмотрим скорость частиц в начальный и конечный моменты времени. Рисунки 5 и 6 и показывают, какую скорость имеют частицы в начальный и конечный моменты времени соответственно при различных диаметрах.

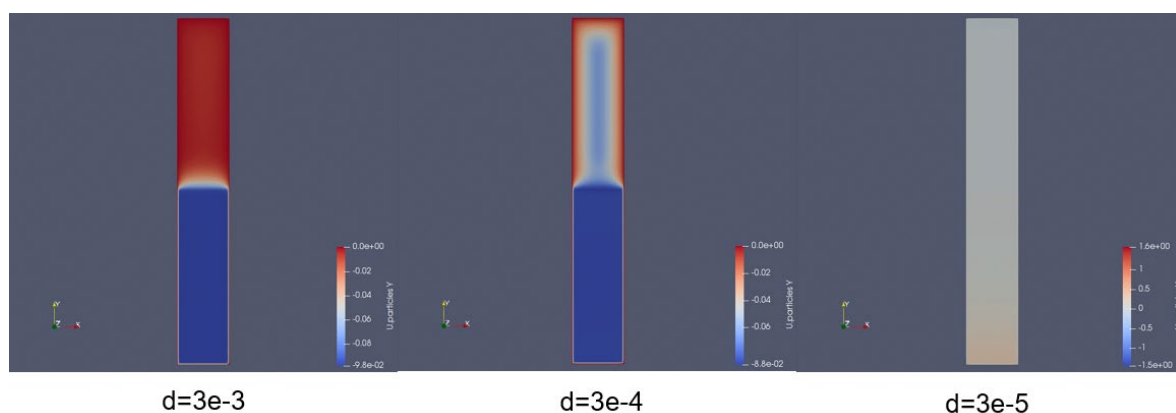


Рисунок 5 – Скорость частиц при различных диаметрах в начальный момент времени

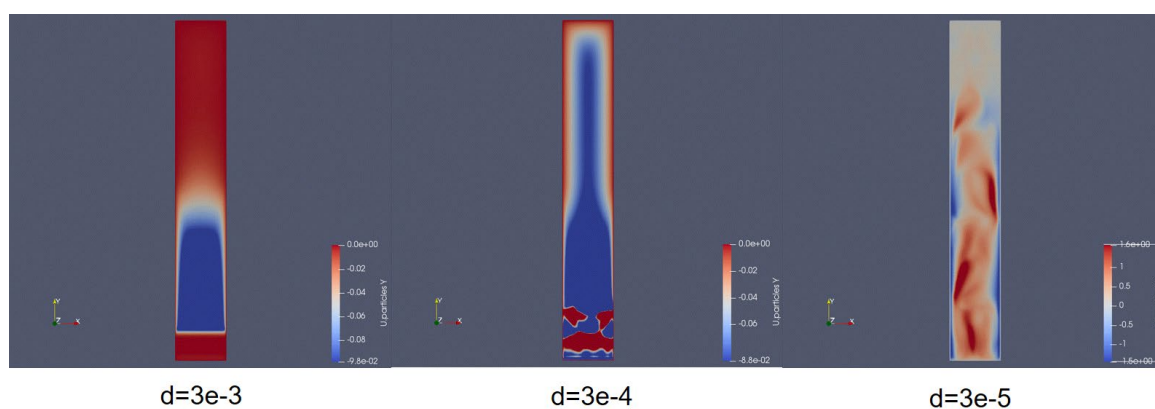


Рисунок 6 – Скорость частиц при различных диаметрах в конечный момент времени

Рассмотрим распределение частиц в начальный и конечный моменты времени. На рисунках 7 и 8 видно, как распределяются частицы в колонне в начальный и конечный моменты времени соответственно при различных диаметрах.

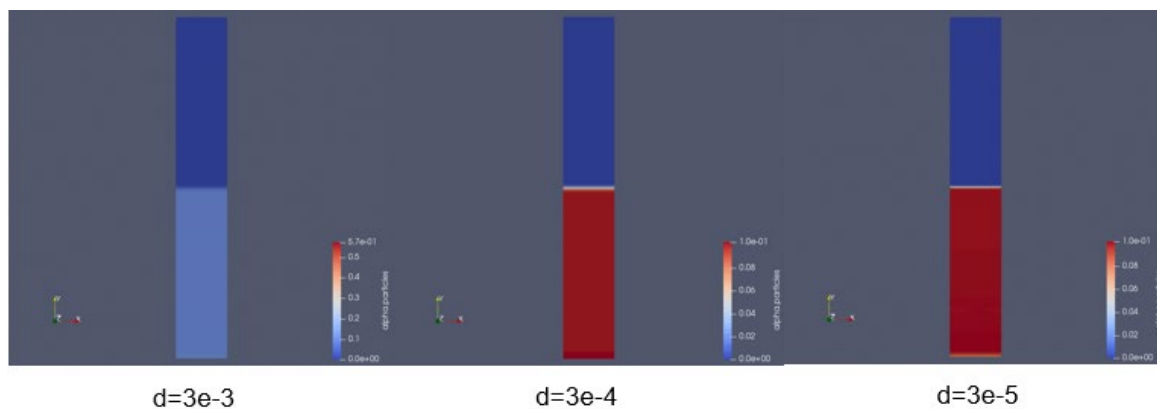


Рисунок 7 – Распределение частиц в колонне при различных диаметрах в начальный момент времени

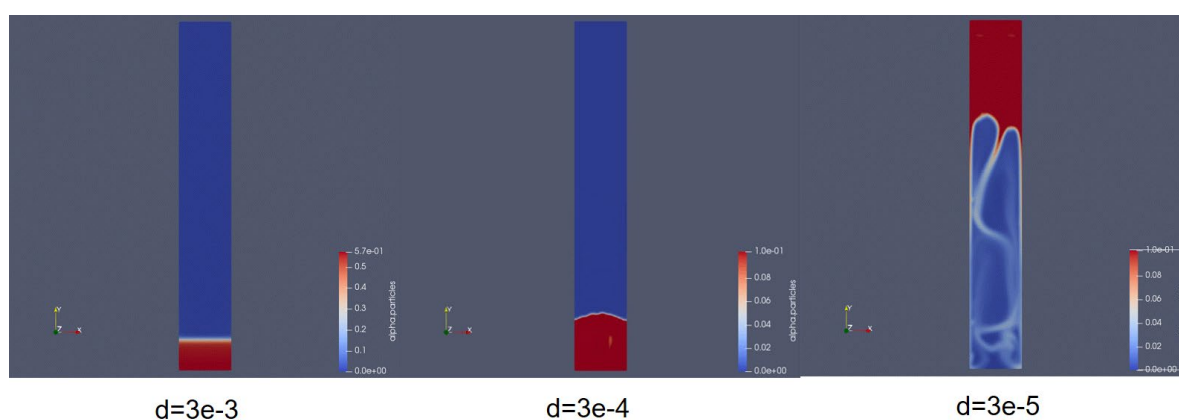


Рисунок 8 – Распределение частиц в колонне при различных диаметрах в конечный момент времени

Из визуализации расчетов можем сделать ряд выводов.

- 1) Частицы с диаметром  $3e-3$  м при вдувании воздуха в колонну начинают разогреваться, из-за чего повышается температура частиц, но скорости после того, как частицы “легли”, остаются маленькими после слоя частиц. Распределение частиц показывает, что система является устойчивой.
- 2) Частицы с диаметром  $3e-4$  м при вдувании воздуха в колонну начинают разогреваться только в определенных областях. Распределение частиц на рисунке 8 показывает, что после того, как частицы “легли”, появляется кавитация, что видно из рисунка 6, где скорости распределены

областями. Кавитация – это физический процесс образования разрывов сплошности, то есть пузырьков.

- 3) Частицы с размером  $3\text{e}-5$  м при вдувании воздуха в колонну начинают подниматься по колонне, разогреваясь в определенных областях колонны. Распределение скорости в модели подтверждают вышесказанное. Распределение частиц показывает, что появляется неустойчивость, из-за чего частицы не поднимаются вверх “шапочкой”, а разделяются – видна неустойчивость. Это происходит, потому что, как и в реальном мире, так и в компьютерной симуляции не существует идеальной среды. В реальном мире и компьютерной симуляции есть неоднородности, из-за чего и получается результат, как на рисунке 8. В компьютерной симуляции неоднородностями являются погрешности округления.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



### 3 МОДЕЛЬ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

#### 3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

После того, как испытали решатель, перейдем к моделированию вихревой трубы. Геометрия вихревой трубы представлена на рисунке 9. Труба имеет патрубок, через который в модель поступает воздух, холодный и горячий выходы, расположенные по разным концам трубы, завихритель, в котором раскручивается входящий воздух, и диафрагму горячего выхода, представляющую собой усечённый конус, как представлено на рисунке 10. По задумке, воздух будет вдуваться, раскручиваться в завихрителе и распределяться по модели. Разместим “на дне” вихревой трубы разряженные частицы. Попытаемся выяснить, как себя поведут частицы при попадании в модель воздуха. В трубу вдувается воздух со скоростью 50 м. Длина трубы – 0.6 м, диаметр трубы – 0.1 м. Размер частиц –  $3 \times 10^{-5}$  м. Шаг по времени  $1 \times 10^{-4}$  с.

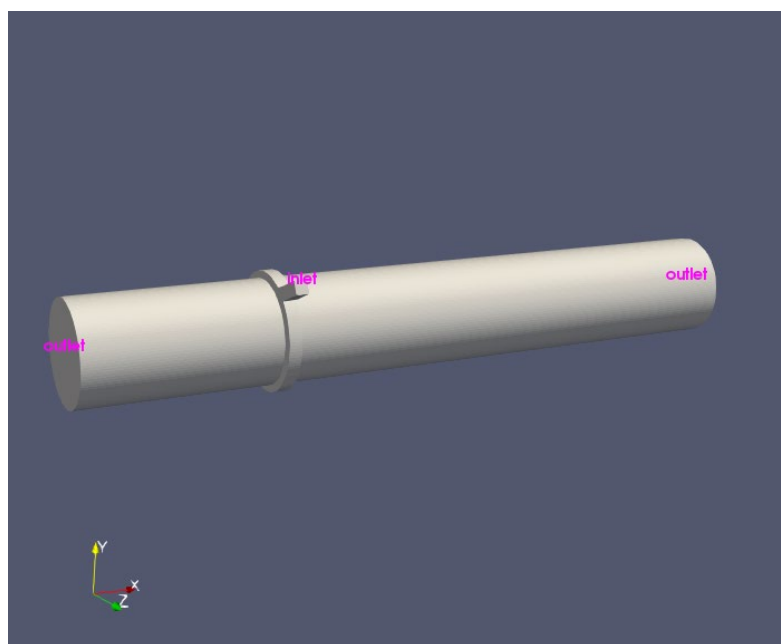


Рисунок 9 – Геометрия вихревой трубы



Рисунок 10 – Демонстрация трубы в разрезе

### 3.2 ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

После того, как была построена сетка, необходимо описать начальные и граничные условия системы. В таблице 3 приведены граничные и начальные условия на стенках для различных переменных.

Таблица 3 – Начальные и граничные условия

Переменная	Начальные и граничные условия
$\alpha$	Равномерное внутреннее поле 0.33, нулевой градиент на стенках
$p$	Внутреннее поле однородно и равно 0, нулевой градиент на стенках
$U_a$	Равномерное внутреннее поле равное 0, равномерное фиксированное значение стен (0 0 0)
$U_b$	Внутреннее поле однородно и равно 0, стены с фиксированным значением однородны (0 0 0)
$\Theta$	Внутреннее поле однородно и равно 0, нулевой градиент на стенках
$\epsilon$	Равномерное внутреннее поле равное 10, нулевая градиентность на стенах

Другими словами, в системе действует условие прилипания на стенках, постоянная скорость на входе, условие постоянного давления на выходе. Нулевая градиентность предполагает, что производная по нормали равно нулю, то есть действует условия протекания. На скорость действует условие прилипания.

### 3.3 ПОСТОБРАБОТКА

После того, как были описаны граничные и начальные условия системы, сгенерирована сетка и выбран решатель, перейдем к расчетам. Расчеты проводились на кластере из-за внушительного объема данных. Запустим решатель и после завершения расчетов запустим скрип ParaFOAM для визуализации получившихся расчетов.

На рисунке 11 демонстрируются частицы, находящиеся “на дне” вихревой трубы, в начальный момент времени. На рисунке 12 представлена труба в разрезе для демонстрации количества частиц.

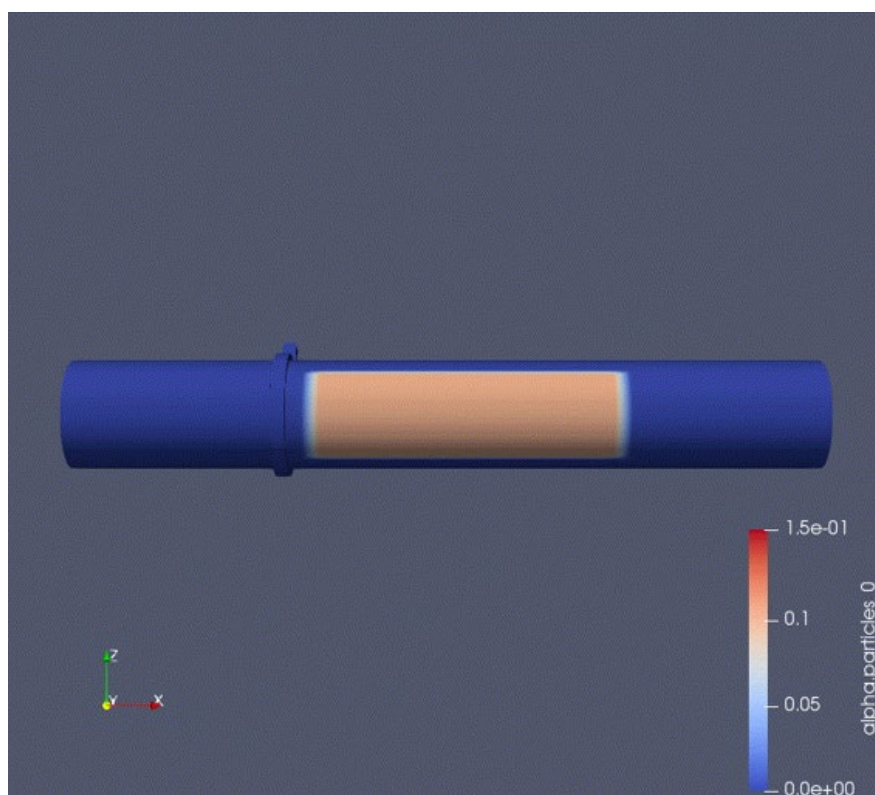


Рисунок 11 – Частицы, находящиеся “на дне” вихревой трубы, в начальный момент времени

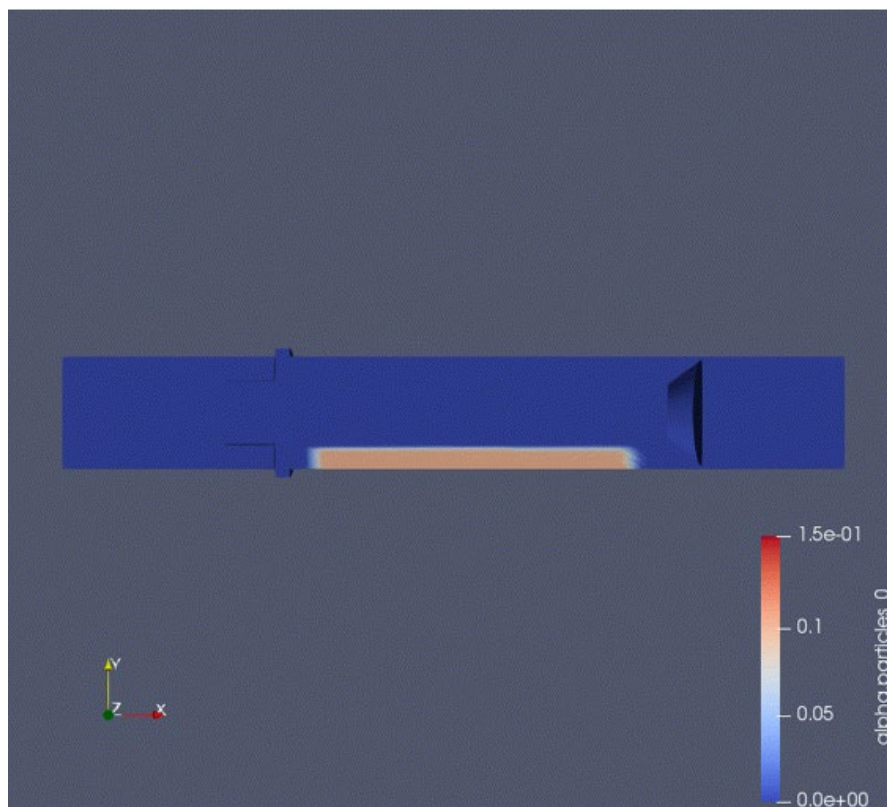


Рисунок 12 – Частицы, находящиеся “на дне” вихревой трубы, в начальный момент времени. Труба в разрезе

Рассмотрим три области в трубе, в начале слоя частиц – 1, в середине – 2 и в конце – 3, как показано на рисунке 13. Для каждой области будет демонстрироваться начальный и конечный моменты времени расчета.

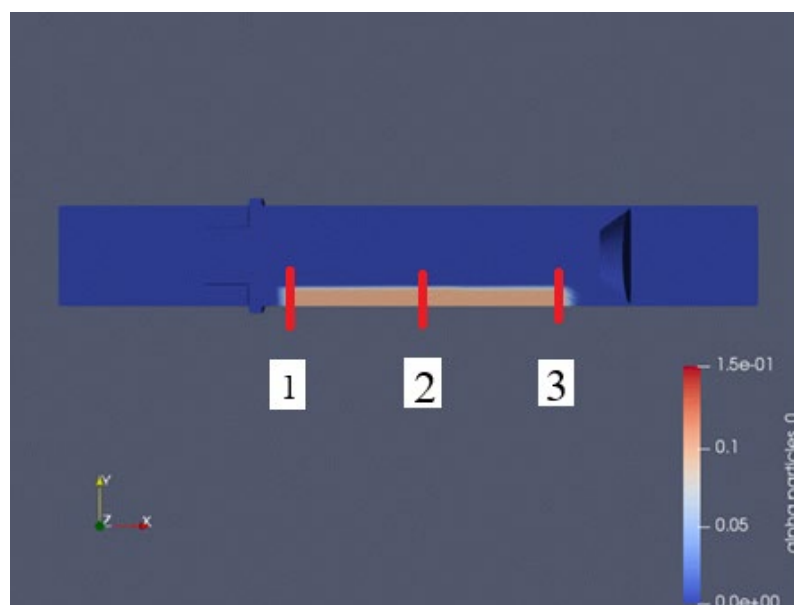


Рисунок 13 – Три области в трубе, которые рассматриваем. Труба в разрезе

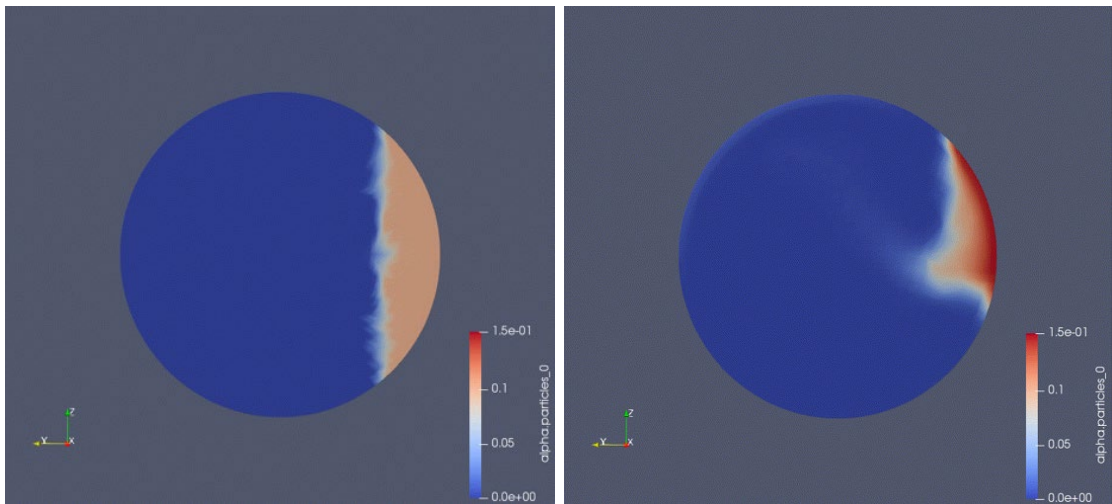


Рисунок 14 – Распределение частиц в 1 области (начало слоя частиц)

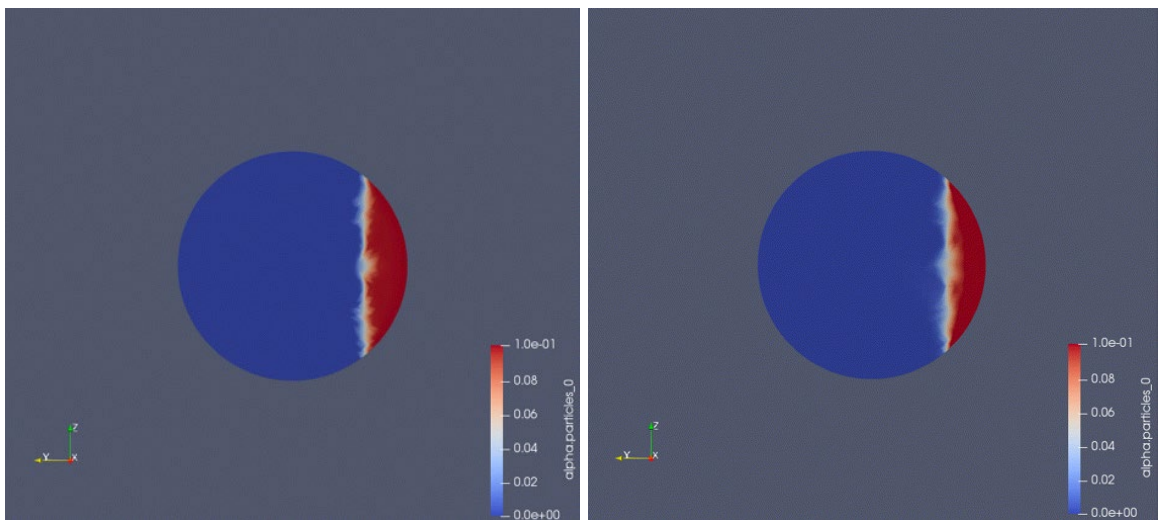


Рисунок 15 – Распределение частиц во 2 области (середина слоя частиц)

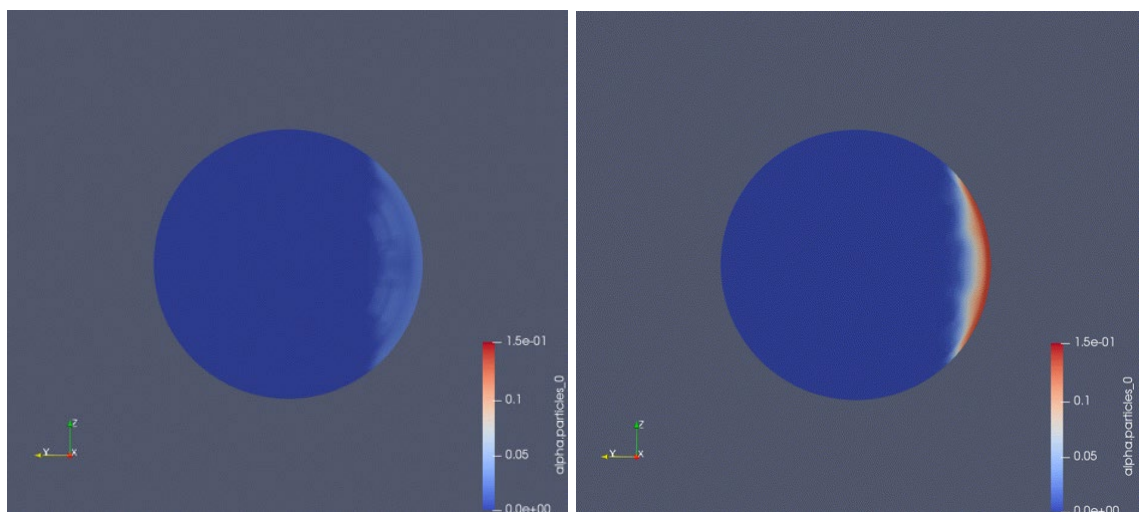


Рисунок 16 – Распределение частиц в 3 области (конец слоя частиц)



Рассмотрим область 1 (начало слоя частиц), как показано на рисунке 14. Видно, что частицы начинают сдвигаться потоком воздуха. На рисунке 15, где демонстрируется область 2 (середина слоя частиц), частицы начинают вдавливать “в дно” вихревой трубы. В области 3 (конец слоя частиц), как показано на рисунке 19, частицы начинают перемещаться из области 2 в 3. Там, где в начальный момент времени не было частиц, появился небольшой слой частиц.

Рассмотрим визуализацию полной трубы, как показано на рисунке 17 и трубу в разрезе, как демонстрируется на рисунке 18. Сравним распределение частиц в начальный и конечный моменты времени.

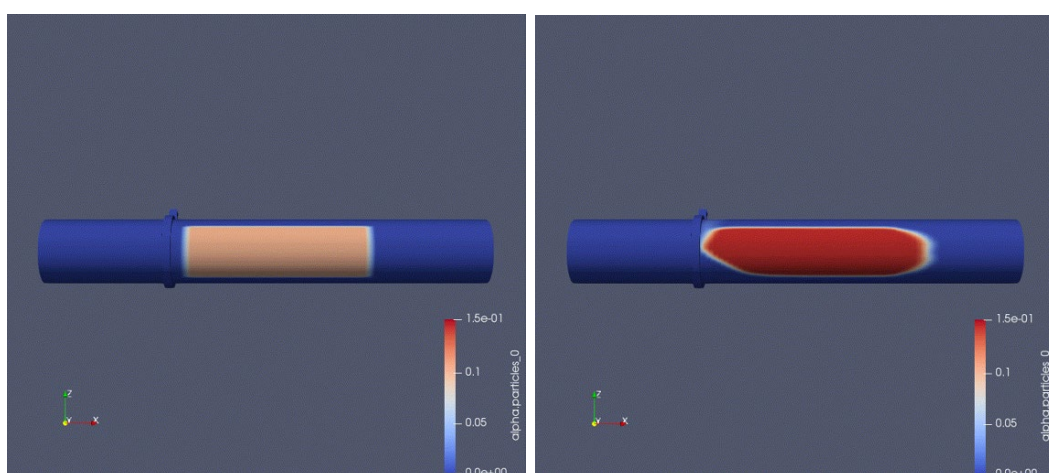


Рисунок 17 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени

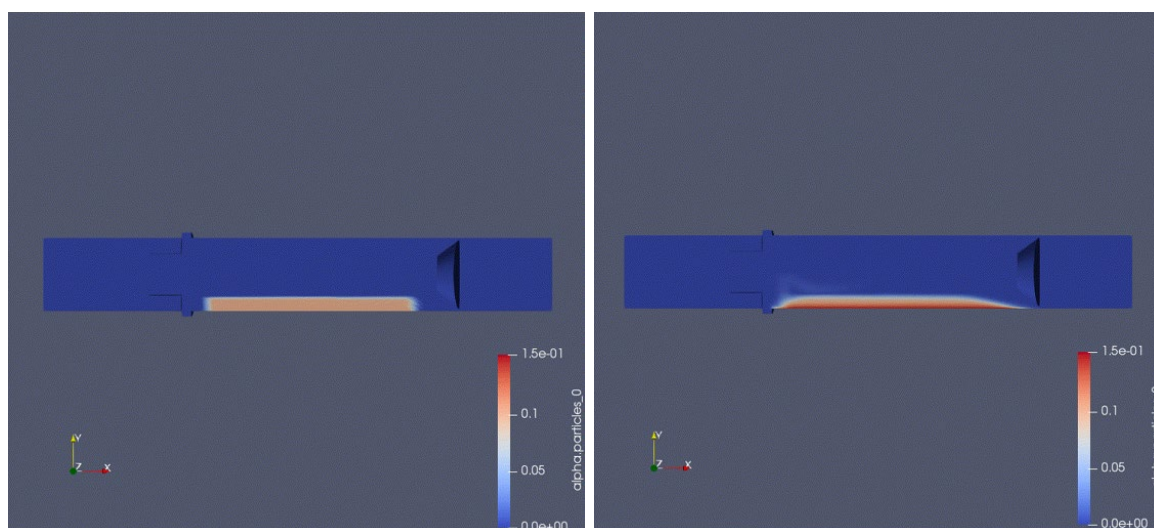


Рисунок 18 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени.

Труба в разрезе

Рассмотрим, как распределяются частицы в завихрителе и скорости в вихревой трубе. Демонстрация распределения частиц показана на рисунке 19 в начальный и конечный моменты времени. Распределение скоростей в начальный и конечный момент времени демонстрируется на рисунке 20.

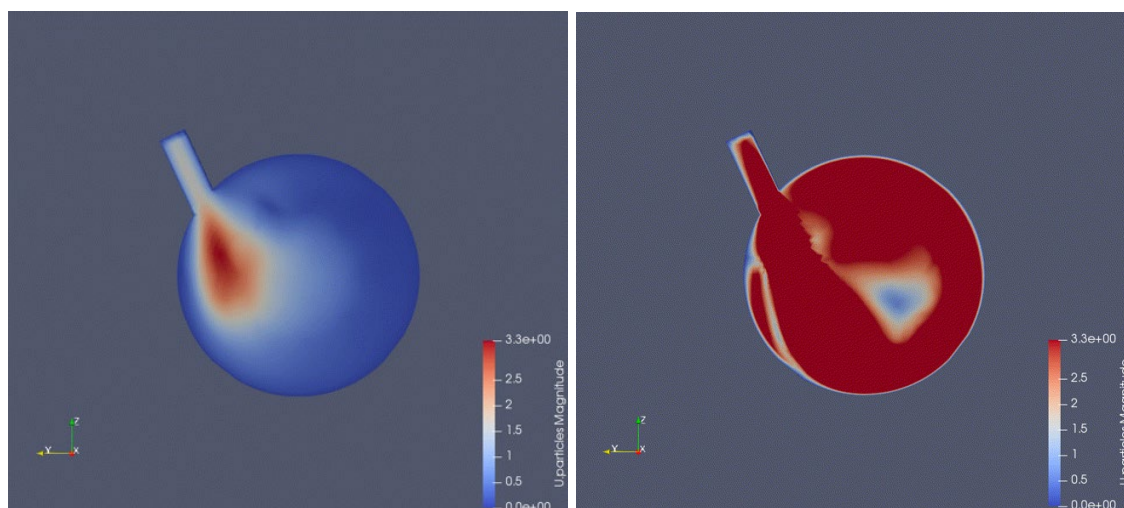


Рисунок 19 – Распределение частиц в завихрителе в начальный и конечный моменты времени. Труба в разрезе

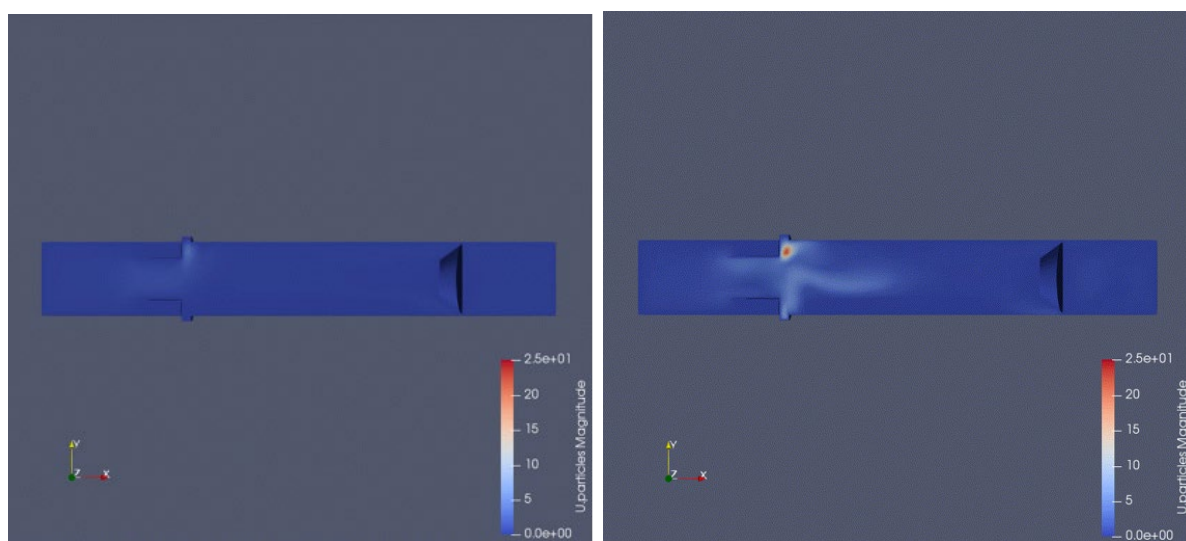


Рисунок 20 – Распределение скоростей в вихревой трубе в начальный и конечный моменты времени. Труба в разрезе

Рассмотрим, как распределяются линии тока по трубе. Демонстрация распределения показана на рисунке 21 в начальный и конечный моменты времени.

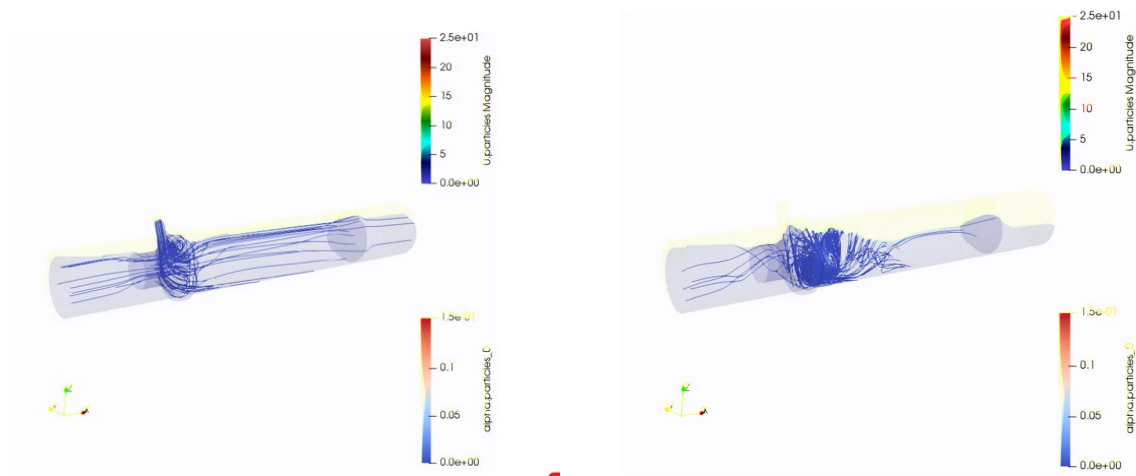


Рисунок 21 – Распределение линий тока в вихревой трубе в начальный и конечный моменты времени

Как видно на рисунках 17 и 18, все вышесказанное подтверждается. Под действием входящего воздуха слой частиц начинает прижиматься к стенке вихревой трубы и смещаться к диафрагме горячего выхода. На рисунке 20 показано, что скорость только начинает нарастать и даже не распределилась по модели, что и подтверждается распределением линий тока на рисунке 21.

Так как взят малый промежуток времени, нельзя сделать полноценный вывод, как поведут себя частицы, куда будут двигаться и что с ними будет происходить. Поэтому увеличим время счета и скорость подаваемого воздуха на 100 м/с. На рисунке 22 показано распределение частиц, после увеличения скорости, в начальный и конечный моменты времени. Разрежем трубу, как показано на рисунке 23, и сравним результаты с предыдущими расчетами.



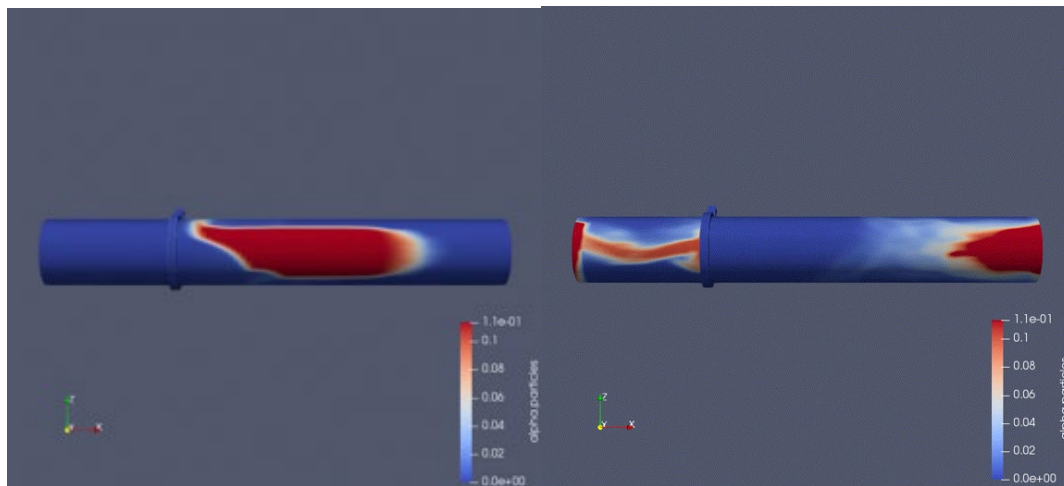


Рисунок 22 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени

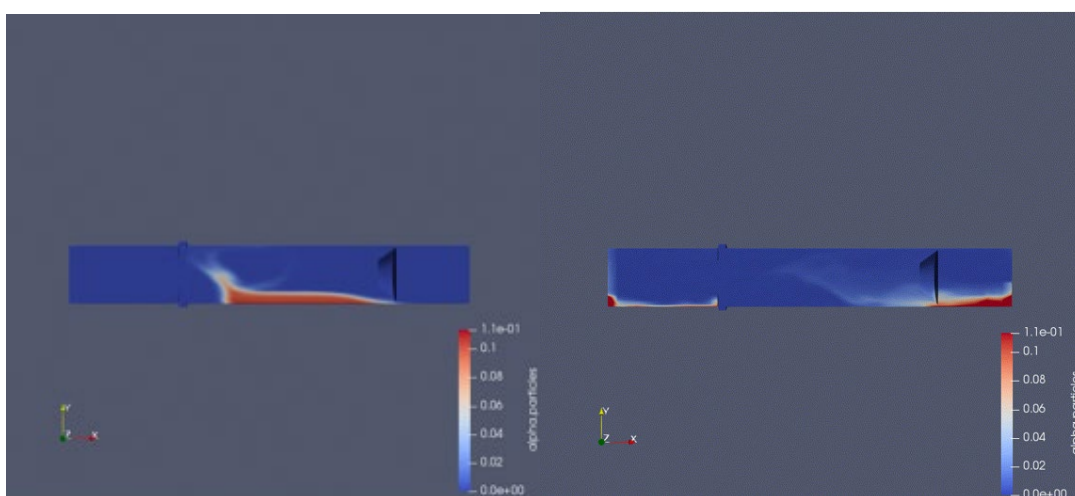


Рисунок 23 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени.

Труба в разрезе

После увеличения скорости и количества расчетного времени видно, что частицы сдуваются к диафрагме горячего выхода, часть частиц сместило к диафрагме холодного выхода. На рисунке 24 показано распределение скоростей по модели в начальный и конечный моменты времени. На рисунке 25 демонстрируется распределение линий тока в модели вихревой трубы.

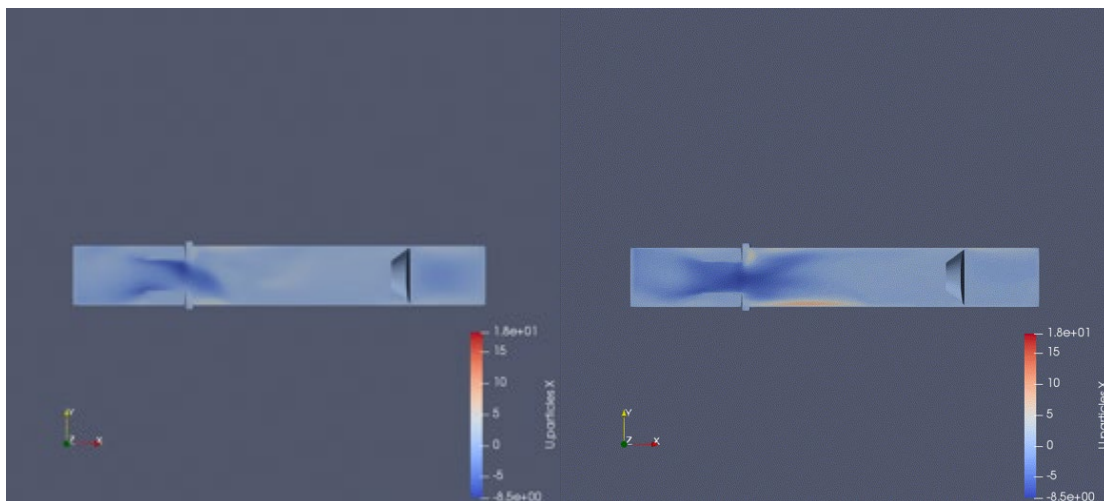


Рисунок 24 – Распределение скоростей в модели в начальный и конечный моменты времени. Труба в разрезе

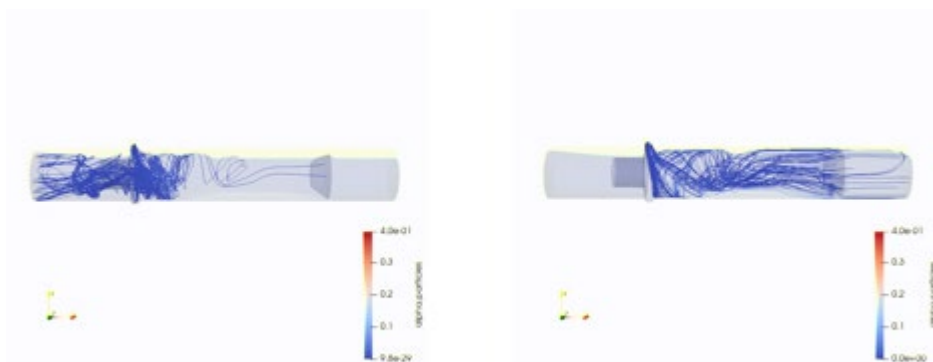


Рисунок 25 – Распределение линий тока в модели

### 3.4 МОДИФИКАЦИЯ ЗАДАЧИ

Видоизменим задачу, убрав из модели частицы, лежащие на дне трубы. Разрежем модель таким образом, чтобы осталась четверть вихревой трубы, для ускорения счета. В модель будет вдуваться частично запыленный воздух со скоростью 25 м/с. Запустим расчет и рассмотрим, как поведет себя модель. Начальные и граничные условия идентичны предыдущей задаче.

На рисунке 26 демонстрируется распределение частиц в начальный и конечный моменты времени в видоизменённой модели. На рисунке 27 показано распределение концентрации частиц в трубе с другого ракурса.

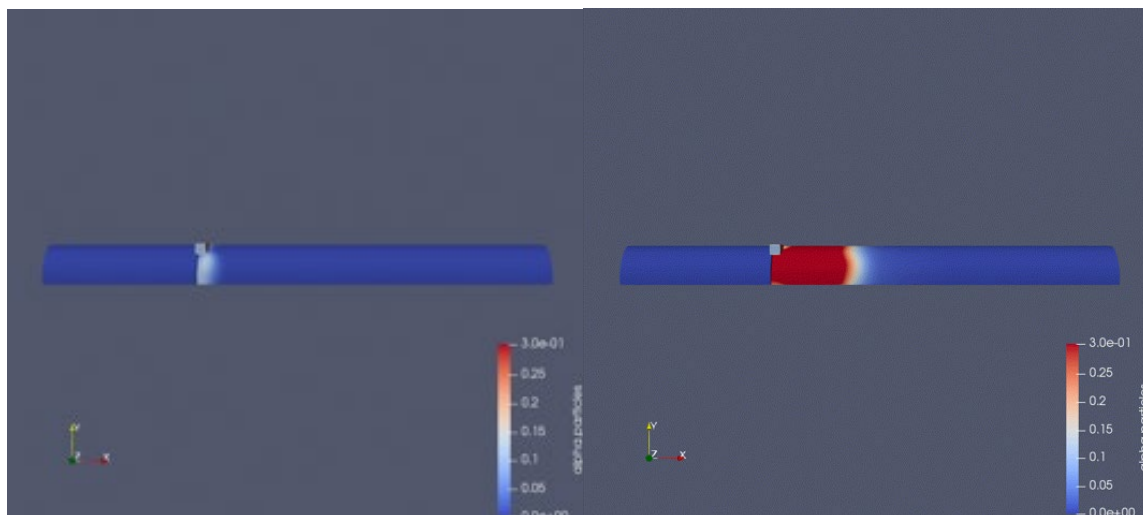


Рисунок 26 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени.

Четверть трубы

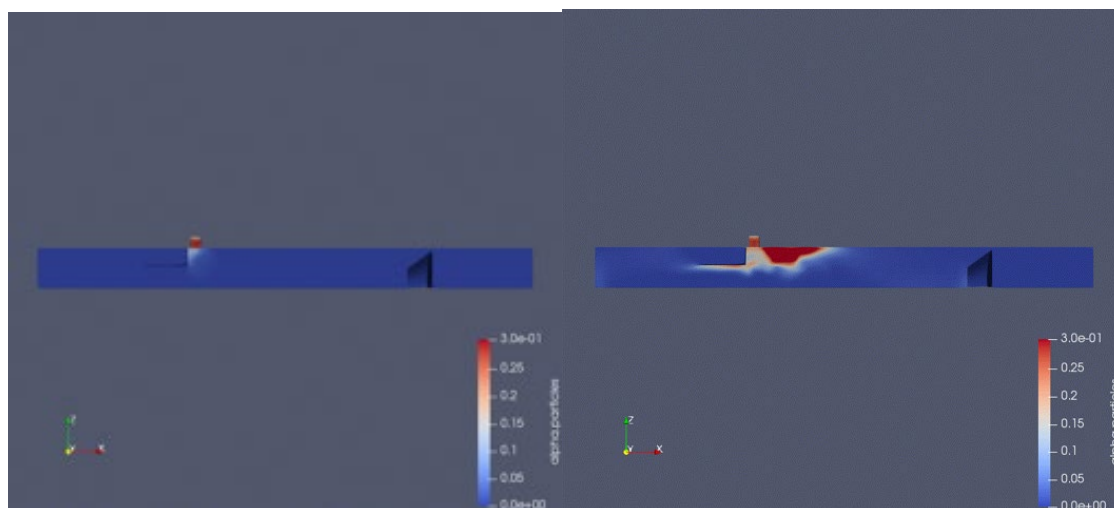


Рисунок 27 – Распределение частиц в начальный и конечный моменты времени.

Четверть трубы. Другой ракурс

На рисунке 27 показано распределений линий тока в начальный и конечный моменты времени в видоизменённой модели.

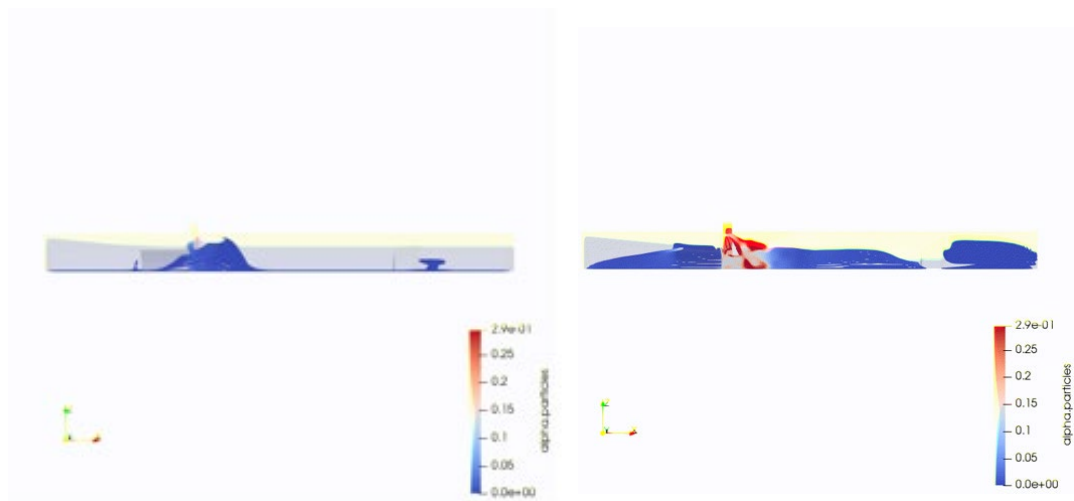


Рисунок 28 – Распределение линий тока в начальный и конечный моменты времени. Четверть трубы

Представленная модель позволяет описывать движение дисперсной среды и может быть использована для стратификации частиц разного размера, плотности в канале вихревой трубы. На рисунках 26 и 27 показано, что скорость только начинает нарастать и частицы не успели распределиться по модели, что и подтверждается распределением линий тока на рисунке 28. Так как взят малый промежуток времени, нельзя сделать полноценный вывод, как поведут себя частицы. В дальнейшем можно будет сделать вывод о том, какое количество частиц выходит через диафрагмы горячего и холодного выходов и как частицы распределились по модели в зависимости от диаметра или плотностей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была подготовлена математическая модель динамики дисперсной среды в потоке несущего сжимаемого флюида на основе основных положений механики сплошной среды. Были изучены уравнение непрерывности и импульса, кинетическая теория потока частиц и межфазный обмен импульсами.

Смоделирована теоретическая задача, основанная на вдувании воздуха в колонну с псевдоожиженным слоем, и проведен анализ полученных данных, исходя из которых было принято решение использовать решатель twoPhaseEulerFoam. Были изучены стандартные решатели OpenFOAM для моделирования динамики многофазных сред. Построена вычислительная сетка модели канала вихревой трубы для исследуемых процессов. По задумке, вихревая труба выступает в роли “холодильника”. В дальнейшем можно будет сделать вывод о том, какое количество частиц выходит через диафрагмы горячего и холодного выходов и как частицы распределились по модели в зависимости от диаметра или плотностей.

Были проведены тестовые расчеты, из которых можно сделать вывод, что расчетное время модели вихревой трубы оказалось мало. Для получения большего количества данных необходимо увеличить расчетное время и проанализировать результаты.

Я подтверждаю, что настоящая работа написана мною лично, не нарушает интеллектуальные права третьих лиц и не содержит сведения, составляющие государственную тайну.

\_\_\_\_\_/ Шамаев И.Р.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jenkins, J. A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles [Текст] / J. Jenkins, S. Savage // J. Fluid Mech. – 1983. – P. 187–202.
2. Lun, C.K.K. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield [Текст] / C.K.K. Lun, S.B. Savage, D.J. Jefferey, N. Chepurniy // J. Fluid Mech. – 1984. – P. 223– 56.
3. Gidaspow, O. Hydrodynamics of circulating fluidized beds [Текст] / O. Gidaspow, R. Bezburuah, J. Ding // Korean Journal of Chemical Engineering. – 1992. – P 141–147.
4. Sokolovski, V.V. Statistics of Granular Media [Текст] / V.V. Sokolovski. – Pergamon Press, 1965. – 288 p.
5. Jackson, R. Some mathematical and physical aspects of continuum models for the motion of granular materials [Текст] / R. Jackson // Theory of Dispersed Multiphase Flow / под ред. R.E. Meyer. – New York: Academic Press, 1983. – P. 291–337.
6. Ding, J. A bubbling fluidization model using theory of granular flow [Текст] / J. Ding, D. Gidaspow // AIChE Journal. – 1990. – № 36(4). – P. 523–538.
7. Syamlal, M. MFIx documentation. Theory guide [Электронный ресурс] : Technical note / M. Syamlal, W. Rogers, T.J. O'Brien. – 1993. – 57 p. – Электрон.дан. – Режим доступа: [https://mfix.netl.doe.gov/doc/mfix-archive/mfix\\_legacy\\_manual/Theory.pdf](https://mfix.netl.doe.gov/doc/mfix-archive/mfix_legacy_manual/Theory.pdf), свободный. – Загл. с экрана.
8. Verification of Eulerian simulation of spontaneous bubble formation in a fluidized bed [Текст] / А. Бомер [и др.] // Chemical Engineering Science. – 1998. – Vol. 53, 10. – P. 1835–1846.
9. Richardson, J.F. Sedimentation and fluidisation: Part I [Текст] / J.F. Richardson, W.N. Zaki // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1954. – V.32. –P. 35–47/
10. Dallavalle, J. M. Micrometrics: The technology of fine particles [Текст] / J.M. Dallavalle. – Pitman Publishing Corporation, 1948. – 555 p.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

11. Garside, J. Velocity-voidage relationships for fluidization and sedimentation in solid-liquid systems [Текст] / J. Garside, M.R. Al-Dibouni // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1977. – V. 16 (2). – P. 206–214.

\_\_\_\_\_/ Шамаев И.Р.

					3952.103108.000 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## (справочное)

### СПИСОК РЕШАТЕЛЕЙ OPENFOAM

Таблица А.1 – Решатели OpenFOAM для многофазного потока

Решатель	Описание
cavitatingFoam	Решатель с переходной кавитацией, основанный на модели однородного равновесия, из которой получается сжимаемость "смеси" жидкость / пар
cavitatingDyMFoam	Решатель с переходной кавитацией, основанный на модели однородного равновесия, из которой получается сжимаемость "смеси" жидкость / пар, с возможностью изменения движения сетки и топологии сетки
compressibleInterFoam	Решатель для двух сжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
compressibleInterDyMFoam	Решатель для двух сжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
compressibleInterFilmFoam	Решатель для двух сжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
compressibleInterIsoFoam	Решатель, полученный из interFoam для двух сжимаемых, несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции isoAdvector с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление



Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
compressibleMultiphaseInterFoam	Решатель для N сжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
driftFluxFoam	Решатель для двух несжимаемых жидкостей с использованием подхода смешения с приближением дрейфового потока для относительного движения фаз
icoReactingMultiphaseInterFoam	Решатель для N несжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с изменением фазы. Использует подход к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости)
interCondensatingEvaporatingFoam	Решатель для двух несжимаемых неізотермических несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (испарение–конденсация) между жидкостью и ее паром. Использует подход к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости)
interFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
interMixingFoam	Решатель для 3–х несжимаемых жидкостей, две из которых смешиваются, с использованием метода VOF для захвата интерфейса, с дополнительными изменениями движения сетки и топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
overInterDyMFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
interIsoFoam	Решатель, полученный из interFoam для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции isoAdvector с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
cavitatingFoam	Решатель с переходной кавитацией, основанный на модели однородного равновесия, из которой получается сжимаемость 'смеси' жидкость / пар
cavitatingDyMFoam	Решатель с переходной кавитацией, основанный на модели однородного равновесия, из которой получается сжимаемость "смеси" жидкость / пар, с возможностью изменения движения сетки и топологии сетки
compressibleInterFoam	Решатель для двух сжимаемых неадиабатических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
compressibleInterDyMFoam	Решатель для двух сжимаемых неадиабатических несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
compressibleInterFilmFoam	Решатель для двух сжимаемых неизотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
compressibleInterIsoFoam	Решатель, полученный из interFoam для двух сжимаемых, несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции isoAdvector с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки
compressibleMultiphaseInterFoam	Решатель для N сжимаемых неизотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода определения фазовой доли VOF (объем жидкости) на основе интерфейса
driftFluxFoam	Решатель для двух несжимаемых жидкостей с использованием подхода смешения с приближением дрейфового потока для относительного движения фаз
icoReactingMultiphaseInterFoam	Решатель для N несжимаемых неизотермических несмешивающихся жидкостей с изменением фазы. Использует подход к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости)
interCondensatingEvaporatingFoam	Решатель для двух несжимаемых неизотермических несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (испарение–конденсация) между жидкостью и ее паром. Использует подход к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости)
interFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
interMixingFoam	Решатель для 3-х несжимаемых жидкостей, две из которых смешиваются, с использованием метода VOF для захвата интерфейса, с дополнительными изменениями движения сетки и топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
overInterDyMFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
interIsoFoam	Решатель, полученный из interFoam для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода к захвату интерфейса на основе фазовой фракции isoAdvector с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
cavitatingFoam	Решатель с переходной кавитацией, основанный на модели однородного равновесия, из которой получается сжимаемость 'смеси' жидкость / пар
interPhaseChangeFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует VOF (объем жидкости) для захвата интерфейса на основе фазовой фракции

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
interPhaseChangeDyMFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует захват интерфейса на основе фазовой доли VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
MPPICInterFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода, основанного на регистрации раздела фаз VOF (объем жидкости). Импульс и другие свойства жидкости относятся к "смеси", и решается единственное уравнение импульса
multiphaseEulerFoam	Решатель для системы из множества сжимаемых жидких фаз, включая теплопередачу
multiphaseInterFoam	Решатель для N несжимаемых жидкостей, который фиксирует границы раздела и включает эффекты поверхностного натяжения и угла контакта для каждой фазы, с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки
potentialFreeSurfaceFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения однофазных приближений свободной поверхности
potentialFreeSurfaceDyMFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения аппроксимации однофазной свободной поверхности с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
reactingMultiphaseEulerFoam	Решатель для системы из любого числа сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
reactingTwoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
twoLiquidMixingFoam	Решатель для смешивания двух несжимаемых жидкостей
twoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с одной дисперсной фазой. Например, пузырьки газа в жидкости, включая теплообмен
interPhaseChangeFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует VOF (объем жидкости) для захвата интерфейса на основе фазовой фракции

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
interPhaseChangeDyMFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует захват интерфейса на основе фазовой доли VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
MPPICInterFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода, основанного на регистрации раздела фаз VOF (объем жидкости). Импульс и другие свойства жидкости относятся к "смеси", и решается единственное уравнение импульса
multiphaseEulerFoam	Решатель для системы из множества сжимаемых жидких фаз, включая теплопередачу
multiphaseInterFoam	Решатель для N несжимаемых жидкостей, который фиксирует границы раздела и включает эффекты поверхностного натяжения и угла контакта для каждой фазы, с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки
potentialFreeSurfaceFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения однофазных приближений свободной поверхности
potentialFreeSurfaceDyMFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения аппроксимации однофазной свободной поверхности с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
reactingMultiphaseEulerFoam	Решатель для системы из любого числа сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
reactingTwoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
twoLiquidMixingFoam	Решатель для смешивания двух несжимаемых жидкостей
twoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с одной дисперсной фазой. Например, пузырьки газа в жидкости, включая теплообмен
interPhaseChangeFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует VOF (объем жидкости) для захвата интерфейса на основе фазовой фракции



Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
interPhaseChangeDyMFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с изменением фазы (например, кавитацией). Использует захват интерфейса на основе фазовой доли VOF (объем жидкости) с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки, включая адаптивное повторное зацепление
MPPICInterFoam	Решатель для двух несжимаемых, изотермически несмешивающихся жидкостей с использованием подхода, основанного на регистрации раздела фаз VOF (объем жидкости). Импульс и другие свойства жидкости относятся к "смеси", и решается единственное уравнение импульса
multiphaseEulerFoam	Решатель для системы из множества сжимаемых жидких фаз, включая теплопередачу
multiphaseInterFoam	Решатель для N несжимаемых жидкостей, который фиксирует границы раздела и включает эффекты поверхностного натяжения и угла контакта для каждой фазы, с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки
potentialFreeSurfaceFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения однофазных приближений свободной поверхности
potentialFreeSurfaceDyMFoam	Несжимаемый решатель Навье–Стокса с включением поля высоты волны для обеспечения аппроксимации однофазной свободной поверхности с дополнительным перемещением сетки и изменениями топологии сетки

Продолжение таблицы А.1

Решатель	Описание
reactingMultiphaseEulerFoam	Решатель для системы из любого числа сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
reactingTwoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с общим давлением, но в остальном разными свойствами. Тип фазовой модели выбирается во время выполнения и может необязательно представлять несколько видов и однофазных реакций. Система фаз также выбирается во время выполнения и может дополнительно представлять различные типы импульса, тепло– и массопереноса
twoLiquidMixingFoam	Решатель для смешивания двух несжимаемых жидкостей
twoPhaseEulerFoam	Решатель для системы из двух сжимаемых жидких фаз с одной дисперсной фазой. Например, пузырьки газа в жидкости, включая теплообмен