

# 1 Тема

Численное моделирование дисперсных потоков, формируемых при лазерной наплавке.

## 2 Состав коллектива

Зайцев Александр Васильевич, к.ф.-м.н. с.н.с ИТПМ СО РАН

Гуляев Игорь Павлович, с.н.с ИТПМ СО РАН

Гурин Алексей Михайлович, м.н.с ИТПМ СО РАН

Ермолаев Григорий Викторович, к.ф.-м.н. с.н.с ИТПМ СО РАН

Полянский Тимофей Андреевич, лаборант ИТПМ СО РАН

## 3 Информация о грантах

РФФИ № 17-48-540781 р\_а, «Численное и экспериментальное исследование дисперсных потоков, формируемых коаксиальными соплами при лазерной наплавку», руководитель Зайцев А. В.

## 4 Научное содержание работы

### 4.1 Аннотация

Данная работа посвящена исследованию важной научной и технологической проблемы в лазерной порошковой наплавке - увеличению коэффициента использования порошка. Рассматривается двухфазный газо-порошковый поток формируемый наплавочными соплами и его фокусировка. Основное внимание уделено взаимодействию частиц порошка со стенками сопла. Представлены результаты численного моделирования и их сравнение с экспериментальными данными полученными методом оптической диагностики.

### 4.2 Постановка задачи

Несмотря на то, что газовые потоки с микрочастицами давно изучены, область применения настолько широка, что для каждой конкретной области существуют разные физические модели. При лазерной наплавке, как правило, скорости частиц и газа не превышают 30 м/с. Размеры каналов составляют около нескольких миллиметров. Следовательно, в сопле частицы испытывают многочисленные столкновения со стенками. Форма порошковой струи зависит от плотности материала, распределения по размерам и сферичности. Тем не менее, наиболее важными факторами является материал стенок сопла и качество его обработки, который определяет закон взаимодействия частиц и сопла. Размер частиц, характерные для лазерной наплавке лежат в диапазоне от 30 до 100 мкм. Удобнее использовать частицы с высокой сферичностью. Их поведение более предсказуемо в потоке и во время нагрева. Поэтому порошок, который мы использовали в нашей работе, представляет собой никель-хромовый сплав с хорошей сферичностью и размером частиц 20-60 мкм. Подача порошка осуществлялась через медные и стальные трубки диаметром 3-8 мм. Диапазон скорости газа составлял от 5 до 40 м/с.

Газодинамические силы действующие на частицу: сила сопротивления, сила Магнуса, сила Саффмана, эффект присоединённой массы. Как показали наши исследования, для

условий лазерной наплавки последние три члена имеют небольшой эффект и им можно пренебречь. Таким образом, можно пренебречь явлениями вращения частиц в газе. Это удобно, потому что это очень сложно определить характеристики сферического вращения микрочастиц экспериментальным путем. Однако вращение частиц играет важную роль при взаимодействии частиц с соплами, например, в работах Зоммерфельда и Циркунова. В нашей работе мы старались избегать необходимости контролировать угловую скорость частиц, вводя более простые модели для взаимодействия частиц и стенок сопла. Здесь мы использовали модель с коэффициентами восстановления касательной и нормальной компонент скорости. Эти коэффициенты являются строго эмпирическими на основе статистических экспериментальных данных. Всегда они прочно связаны с определенным материалом сопла и порошка. На первый взгляд, мы не можем пренебрегать силой, оказываемой частицами на газ. В нашей работе мы пришли к интересному наблюдению. Несмотря на это, газ передаёт значительный импульс частицам порошка, в процессе лазерной наплавки скорость газа поддерживается постоянной, а не его давление. Таким образом, добавляя частицы в поток газа, мы меняем распределение давления газа внутри сопла, но не его скорость. Распределение давления очень мало влияет на частицу по сравнению с силой сопротивления. Таким образом, в большинстве случаев влиянием частиц на силу газа можно пренебречь.

Общепринято, что взаимодействие частиц друг с другом должно рассматриваться когда объёмная доля дисперсной фазы составляет более 0,01. В большинстве случаев такая концентрация частиц не была достигнута в нашей работе.

Численные расчёты выполнялись при помощи программного обеспечения разработанного на базе пакета OpenFOAM. На предварительном этапе было показано, что влиянием частиц на потоки газа в большинстве задач можно пренебречь. Таким образом, в начале, структура потока газа была рассчитана путём решения уравнений Навье-Стокса с SST-моделью турбулентности. По полученному распределению скоростей газа траектории частиц были рассчитаны в лагранжевом подходе. Распределение частиц по размерам соответствовало экспериментальным данным.

### 4.3 Результаты

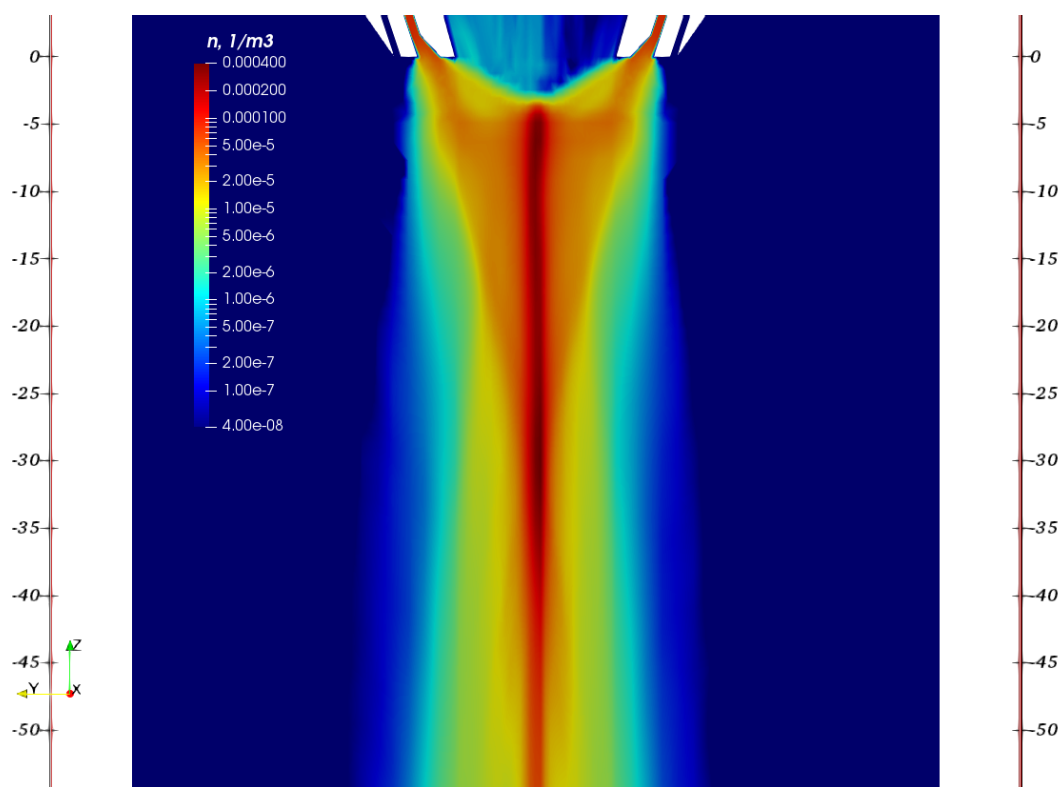
Были проведены расчёты для трубок диаметром 4, 6 и 8 миллиметров. Для всех численных экспериментов длина составляла 100 миллиметров и скорость транспортирующего газа задавалась 10 метров в секунду. Варьировались коэффициенты реституции компонентов скорости в модели взаимодействия частиц порошка со стенками сопла. В численных экспериментах фиксировались координаты и компоненты вектора скорости частиц а также вычислялась средняя объёмная плотность. Ширина струи определялась по статистическому распределению как область в которую попадало 90% частиц. Было установлено что после вылета из трубки на характерных для лазерной наплавке расстояниях скорость и направление полёта частиц меняется незначительно.

В таблице представлена зависимость диаметра струи порошка от коэффициентов модели на расстоянии 20 миллиметров от среза трубки для различных диаметров. Приведены сравнения с размером струи полученным при оптической диагностикой.

Таблица 1: Сравнение рассчитанного и экспериментального диаметра струи на расстоянии 20 миллиметров от среза трубки в зависимости от коэффициентов реституции.

$l, \text{ mm}$	$K_n$	$K_t$	$d_{\text{calc}}, \text{ mm}$	$d_{\text{exp}}, \text{ mm}$
4	1	1	15,94	14
	1	0,95	15,84	14
	0,95	1	10,42	14
6	1	1	16,84	16
	1	0,95	16,84	16
	0,95	1	13,02	16
8	1	1	21	17
	1	0,95	21	17
	0,95	1	14,82	17

Модели обеспечивающие лучшее совпадения с экспериментом впоследствии использовались при расчётах реальной геометрии сопел.



Поле объёмной концентрации частиц на выходе из коаксиального сопла

## 5 Эффект от использования кластера в работе

Разработка модели требует проведения множества численных экспериментов при различных параметрах. Необходимость выполнения моделирования расчётов в сложной трёхмерной геометрии приводит к использованию неструктурированных сеток с большим количеством ячеек. Проведение подобных расчётов на обычной рабочей станции требует много времени. Использование кластера позволило выполнить необходимые расчёты с вариацией параметров в автоматическом режиме и в приемлемые сроки.

## 6 Список публикаций

1. T A Polyanskiy, A V Zaitsev, I P Gulyaev, and A M Gurin. Numerical and experimental investigation of two phase flow for direct metal deposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1109:012010, nov 2018
2. A. V. Zaitsev, I. P. Gulyaev, T. A. Polyanskiy, and A. M. Gurin. Numerical and experimental study of dispersed flow in laser cladding. *AIP Conference Proceedings*, 2027(1):030147, 2018