

# ИЗМЕРЕНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ УРОВНЯ ПУЛЬСАЦИЙ ГРАДИЕНТА ПЛОТНОСТИ ГАЗА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ТЕНЕВОГО ПРИБОРА. СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТОМ RANS/ILES МЕТОДОМ НЕРАСЧЁТНОГО ИСТЕЧЕНИИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов, А.Ю. Макаров  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва  
[keeper@ciam.ru](mailto:keeper@ciam.ru)

# Цель работы

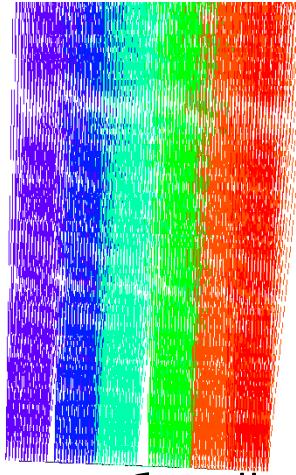
Теневые методы наблюдения за потоком используются давно. Их привлекательность заключается в отсутствии необходимости добавления к потоку примесей для визуализации. Метод основан на том, что показатель преломления газа зависит от его плотности, и градиенты плотности вызывают отклонение лучей, что и фиксируется прибором.

Целью этой работы является разработка способа получения количественных данных о распределении градиента плотности и его уровне пульсаций. В обычной конструкции за изменение плотности отвечает изменение яркости, но яркость зависит ещё от многих факторов, что затрудняет получение данных. Чтобы преодолеть эти проблемы был разработан с создан оптический прибор, в котором за градиент плотности отвечает цвет, а не яркость, что позволяет получать количественные данные.

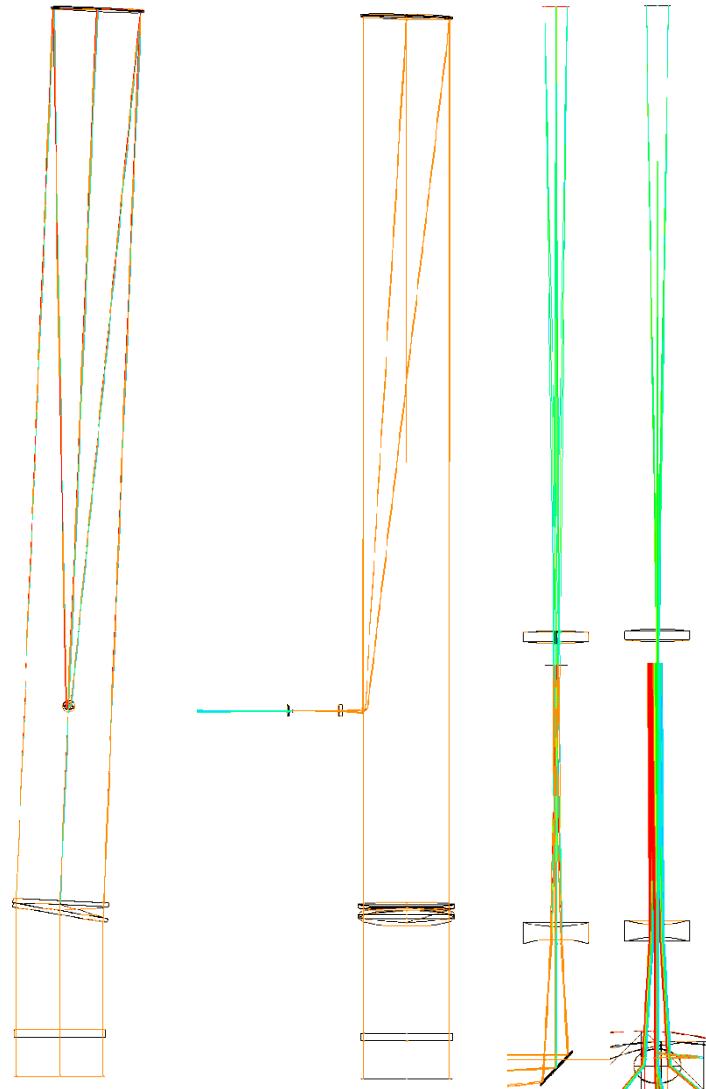
Параметром, который возможно измерить теневым прибором, является интеграл вдоль хода оптического луча от проекции градиента плотности в какой-либо плоскости. Он регистрируется за счёт канала цветности изображения. При этом насыщенность цвета отвечает за уровень пульсаций измеряемого параметра.

# Изменения в конструкции ИАБ-451

- Особенностью схемы является её совместимость с теневым прибором ИАБ-451, используемым на стенде ЦИАМ УВ-16
- Для создания демонстратора были сделаны блок установки призм и приёмная часть прибора с дополнительными линзами для уменьшения дифракции.

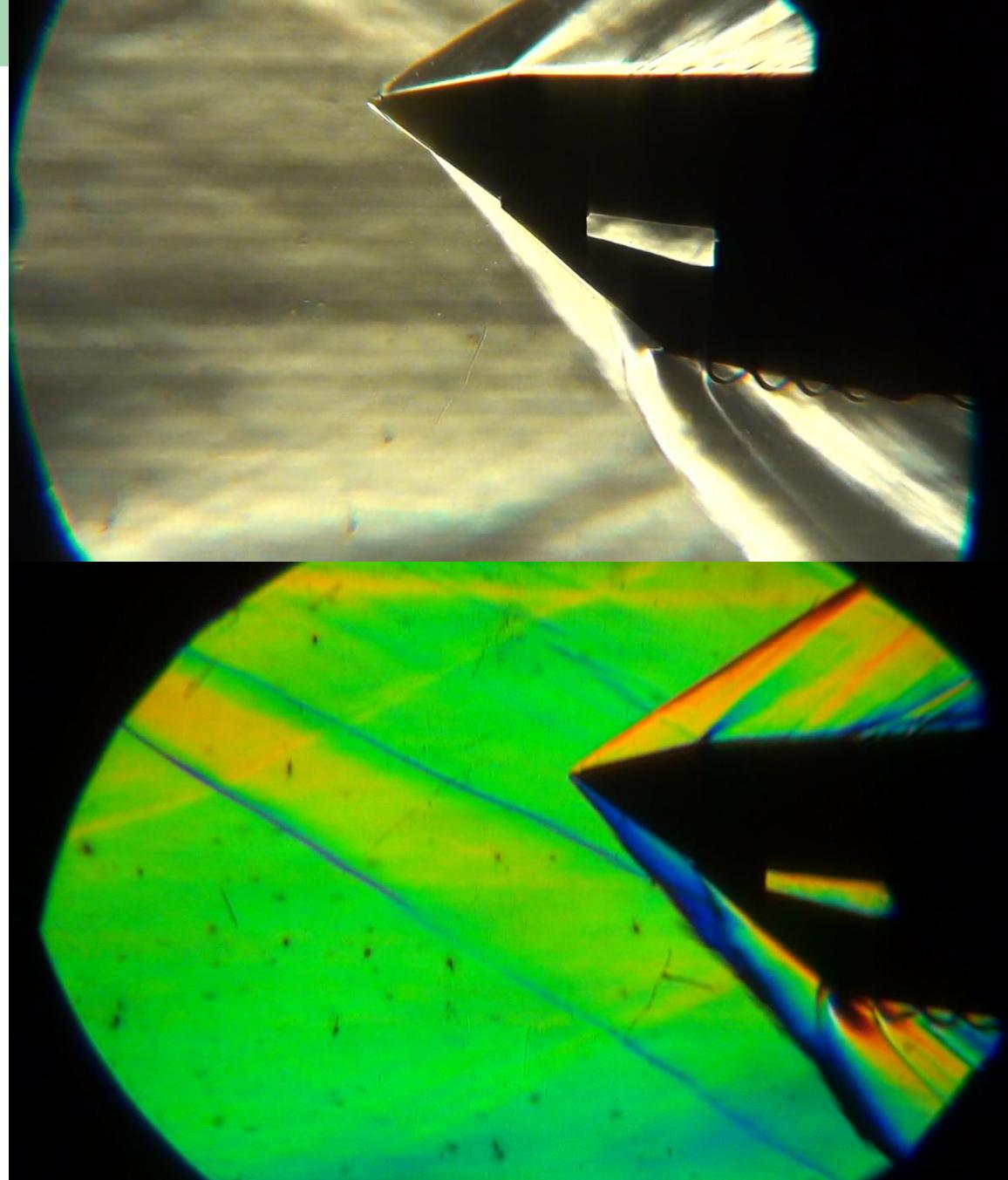


В плоскости диафрагмы вместо белой точки получается радуга, из которой щелевой диафрагмой вырезается один цвет, соответствующий невозмущённому потоку.



# Воздухозаборник при $M=2.5$

Полученные картины  
течений в  
сверхзвуковой трубе  
при классическом и  
новом режима  
теневого прибора  
близки с точки зрения  
качественного  
восприятия структуры  
течения.



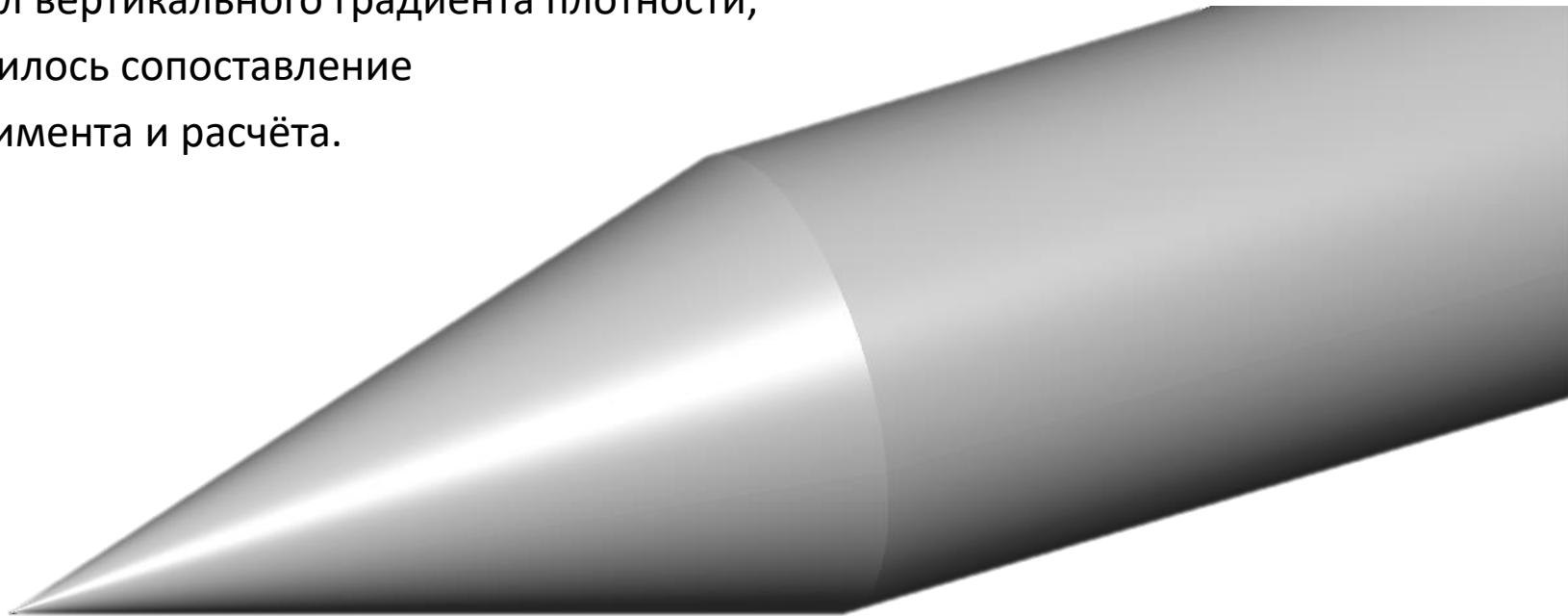
Макаров А.Ю. Измерение градиента плотности теневыми методами.  
СЕАА2016, 19-24 сентября 2016 года, г. Светлогорск

# Калибровка призм для теневого прибора

Чтобы сопоставить цвета, которые дают призмы с разным углом, с конкретными значениями интеграла градиента плотности, были проведены калибровочные испытания , благодаря которым удалось точно определить шкалу для разных призм.

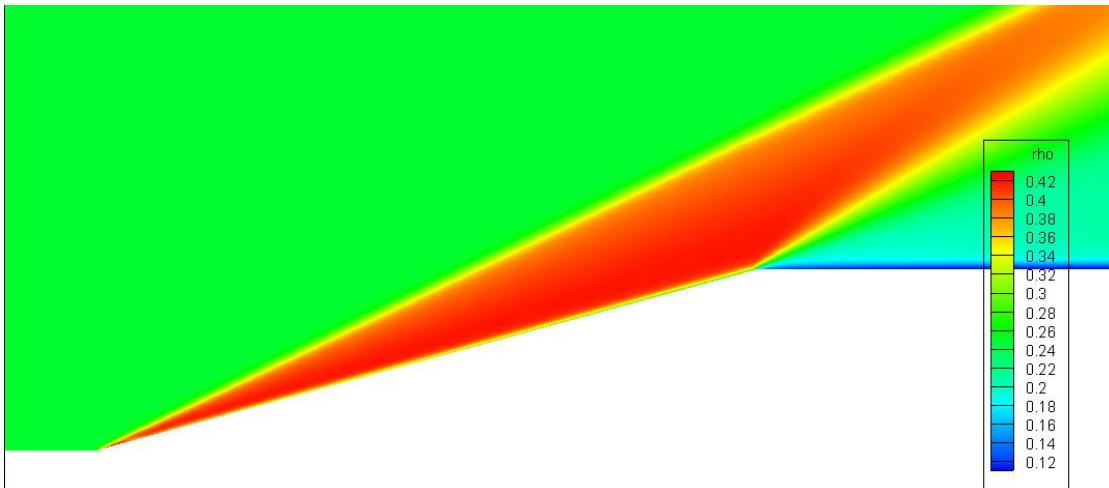
Испытания проводились над конусом с углом 30 градусов в диапазоне чисел Маха 2-4. Калибровка осуществлялась следующим образом:

- в эксперименте записывались изображения с теневого прибора, и параметры набегающего потока (полное давление, температура, число Маха);
- в расчёте (RANS) с аналогичными параметрами считался интеграл вертикального градиента плотности;
- проводилось сопоставление эксперимента и расчёта.



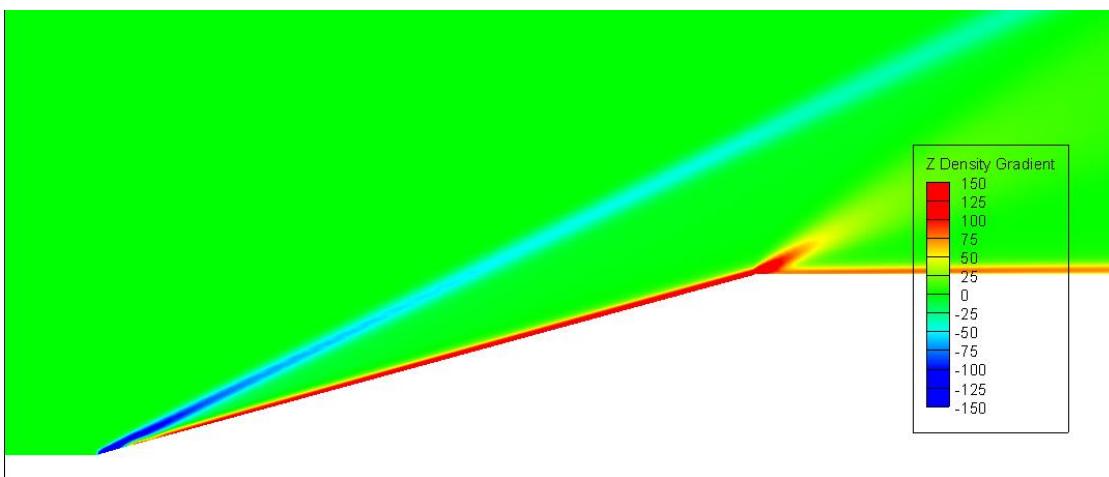
# Обработка расчётных данных для получения интеграла градиента плотности

Плотность в центральном сечении



Обтекание конуса  
при  $M = 3$

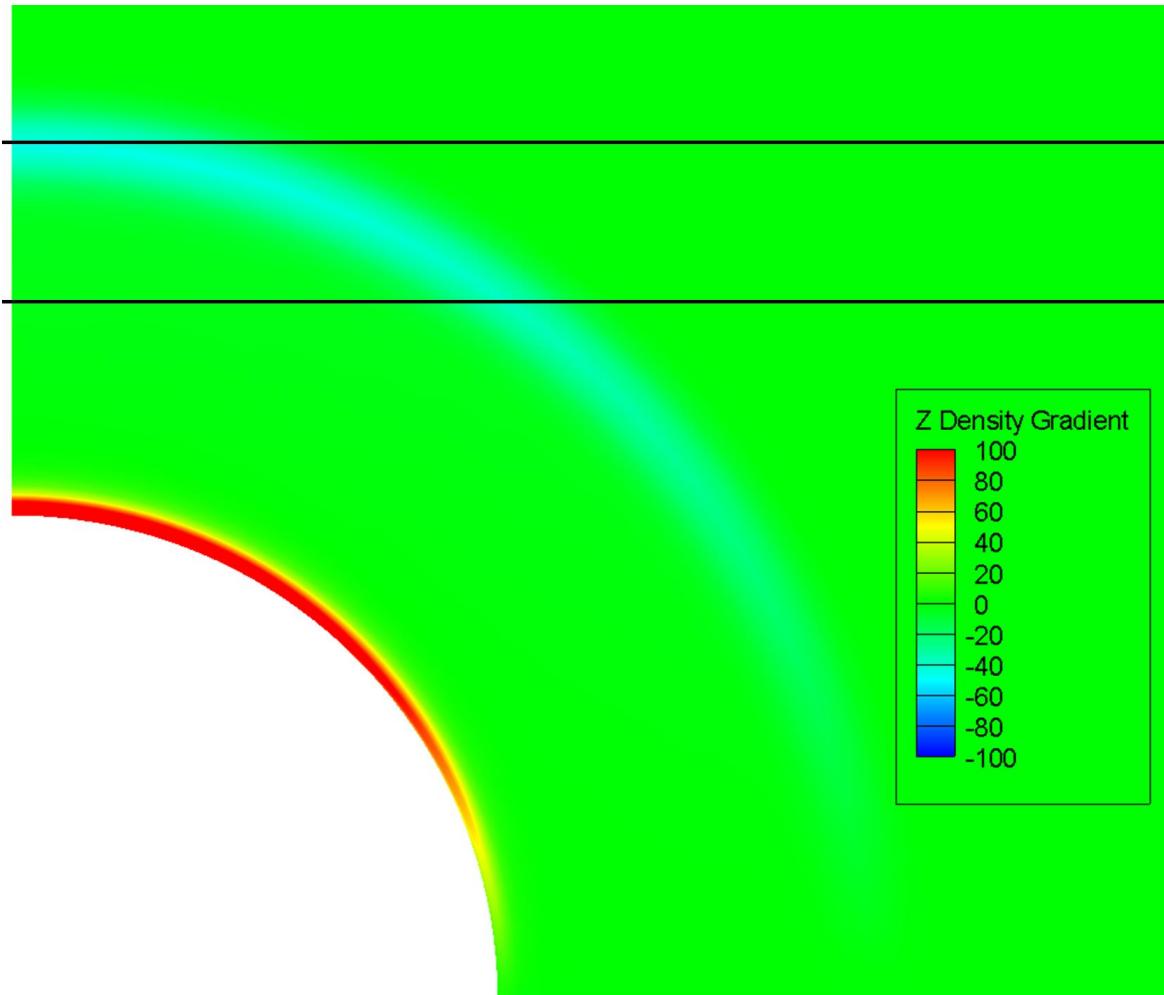
Градиент плотности в центральном сечении (вертикальная компонента)



Синий – снизу плотнее  
чем сверху

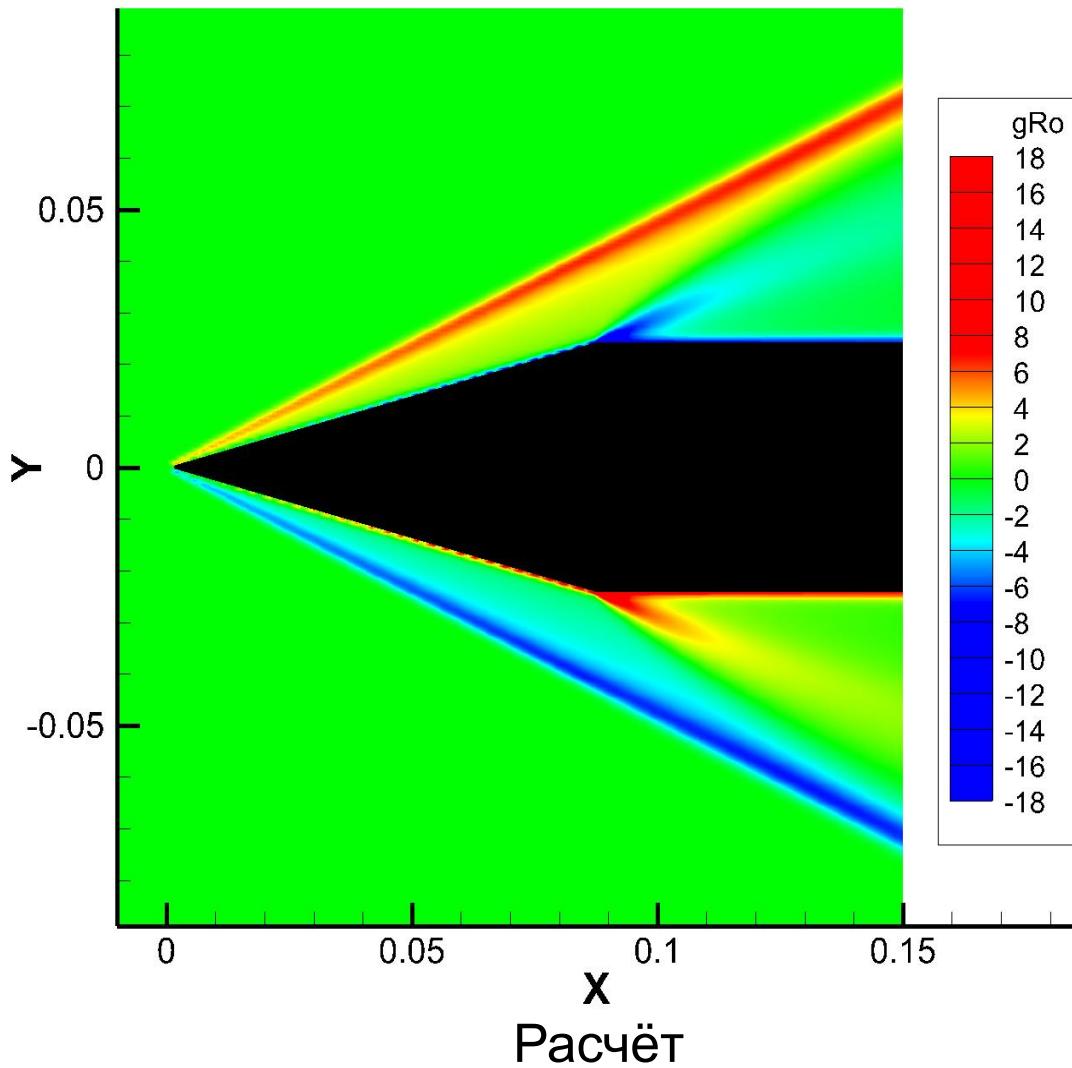
Красный – сверху  
плотнее чем снизу

## Градиент плотности (вертикальная компонента) в поперечном сечении

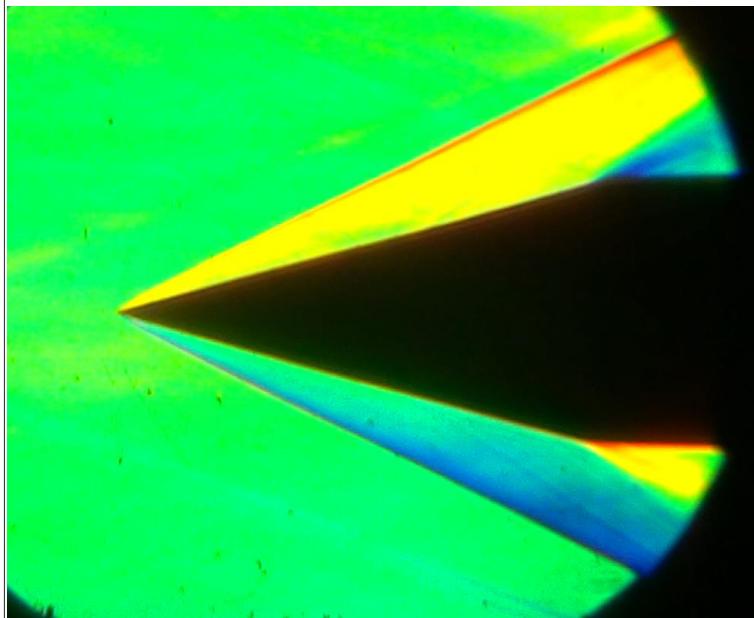


Свет от теневого прибора в этом сечении направлен горизонтально, отклоняясь в каждой точке тем сильнее, чем больше в ней градиент плотности. В результате отклонение луча оказывается пропорциональным интегралу градиента плотности вдоль хода оптического луча. Конструкция прибора позволяет фиксировать отклонение только в одной плоскости – вертикальной.

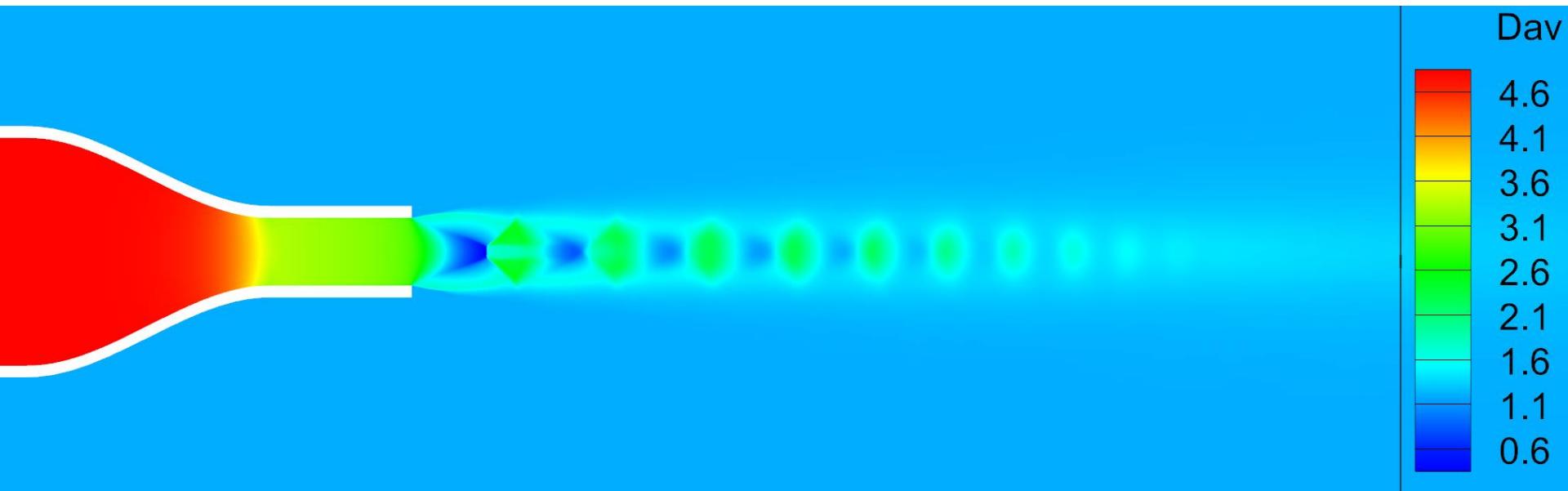
Интеграл вдоль хода оптического луча от градиента плотности  
(вертикальная компонента). Обтекание конуса при  $M = 3$



Эксперимент



# Измерение градиента плотности в сверхзвуковой струе



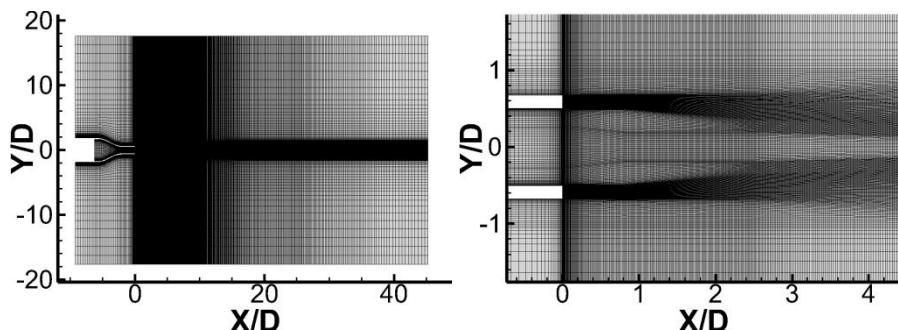
Параметры струи:  
 $P_0=400\text{кPa}$   
 $T_0=293^\circ\text{C}$

Параметры среды:  
 $U=0$   
 $P=100\text{кPa}$   
 $T=293^\circ\text{C}$

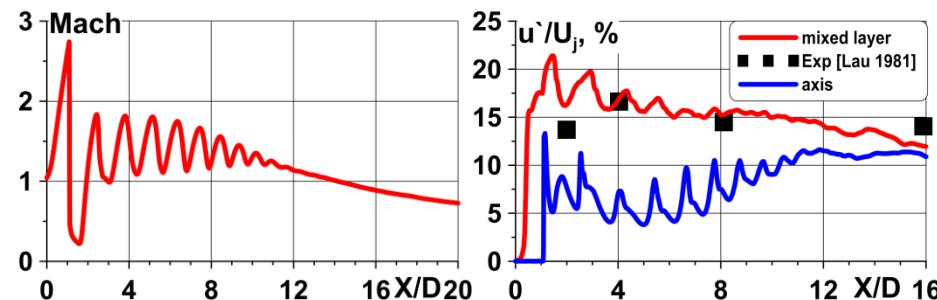
# Расчет струи RANS/ILES методом

$T_{0in}$ , К	293	$M_j$	1.55
$P_{0in}$ , Па	400000	$U_j$ , м/с	439
Сетка	$8.4 \times 10^{-6}$	$Re \times 10^{-6}$	0.52

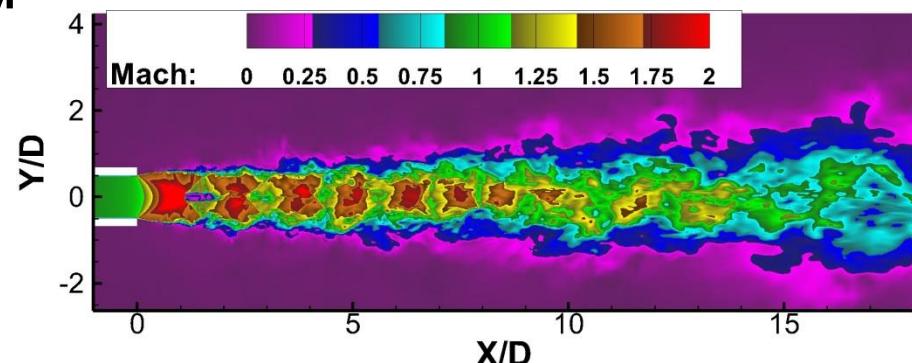
Описание RANS/ILES-метода [Любимов Д.А., ТВТ, 2012, Т.50, №3, С.450-466].



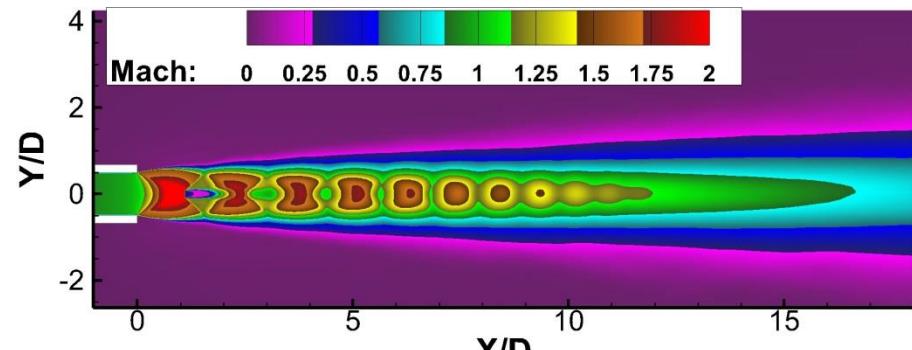
Расчетная сетка в продольном сечении



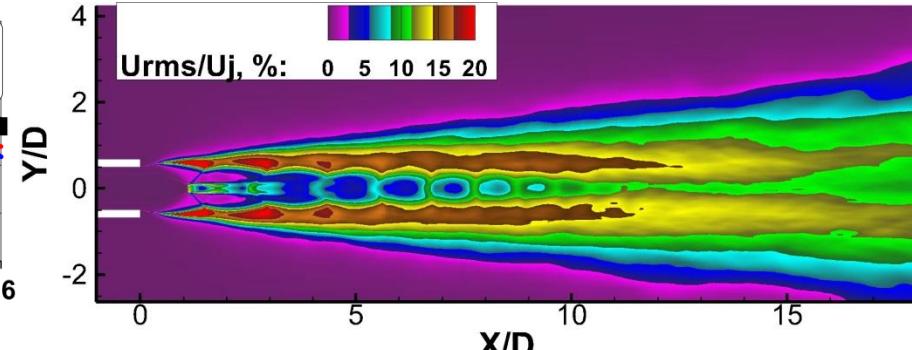
Осредненное число Маха на оси струи и пульсации продольной скорости



Поле мгновенного числа Маха



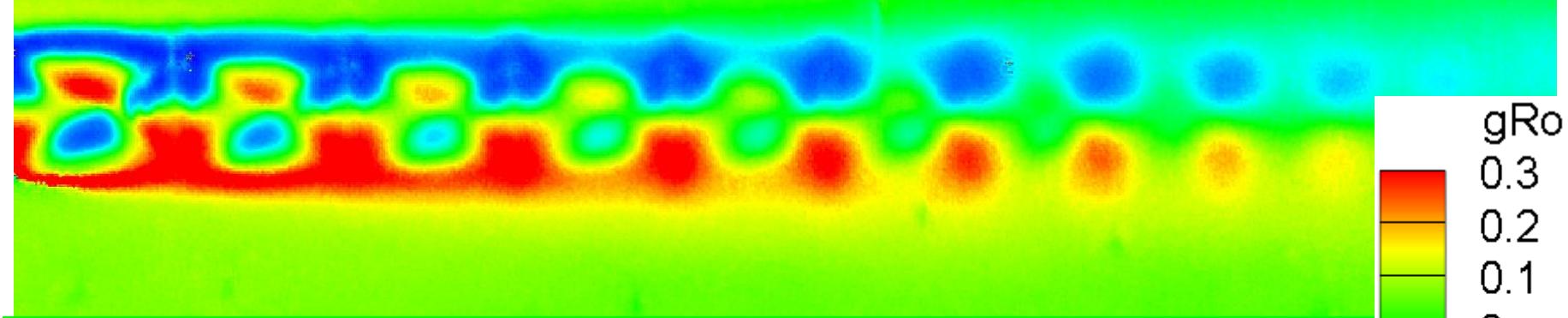
Поле осредненного числа Маха



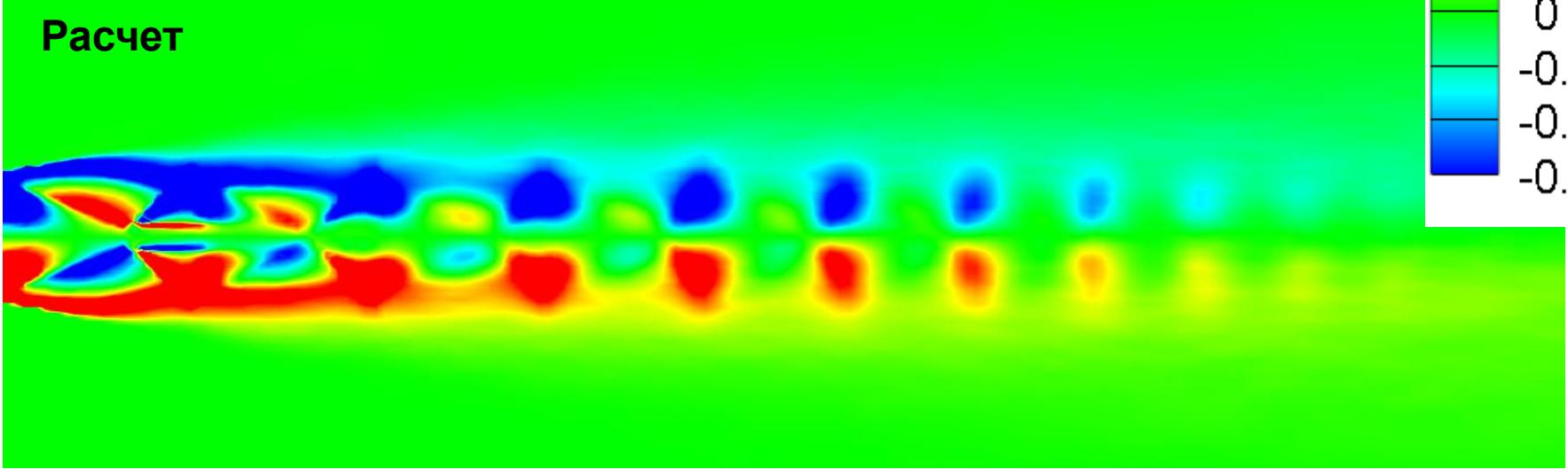
Поле пульсаций продольной скорости

Интеграл вдоль хода оптического луча от вертикальной компоненты градиента плотности. Эксперимент и расчёт.

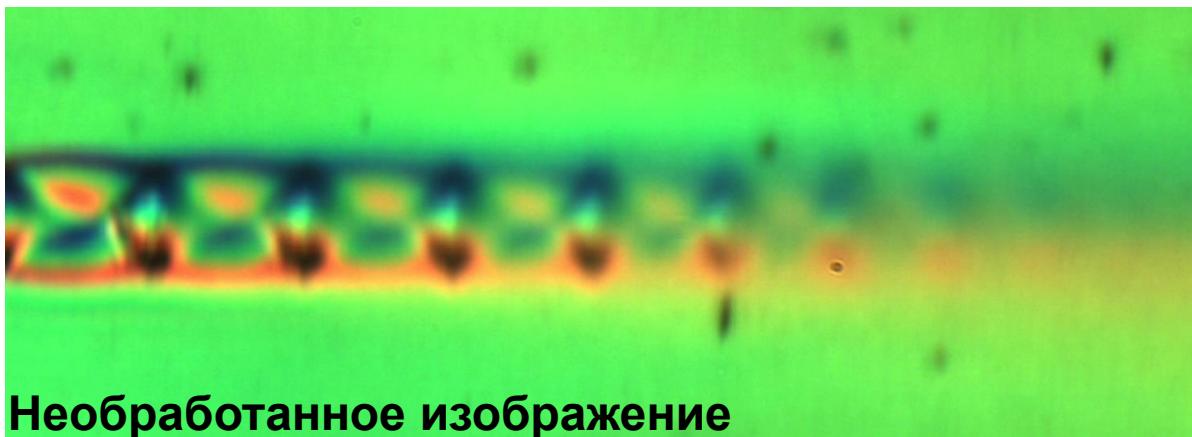
**Эксперимент**



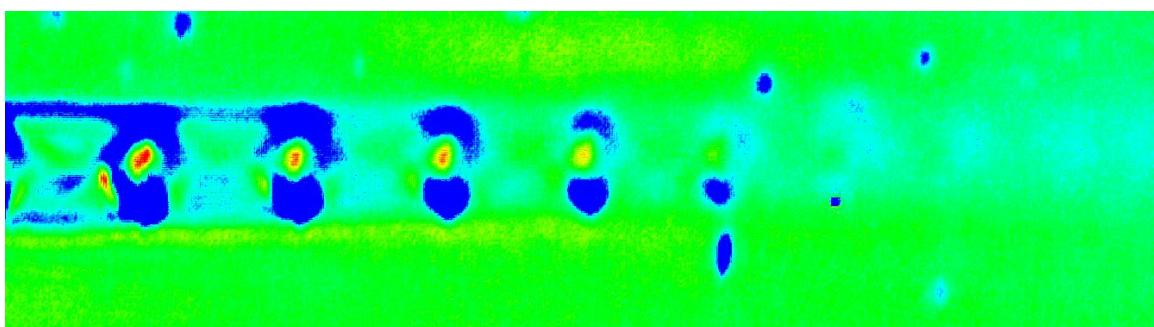
**Расчет**



# Измерение уровня пульсаций градиента плотности



Исходное изображение.  
Чёрные области –  
зашкаливание.  
Светлые области –  
повышенные пульсации  
градиента плотности



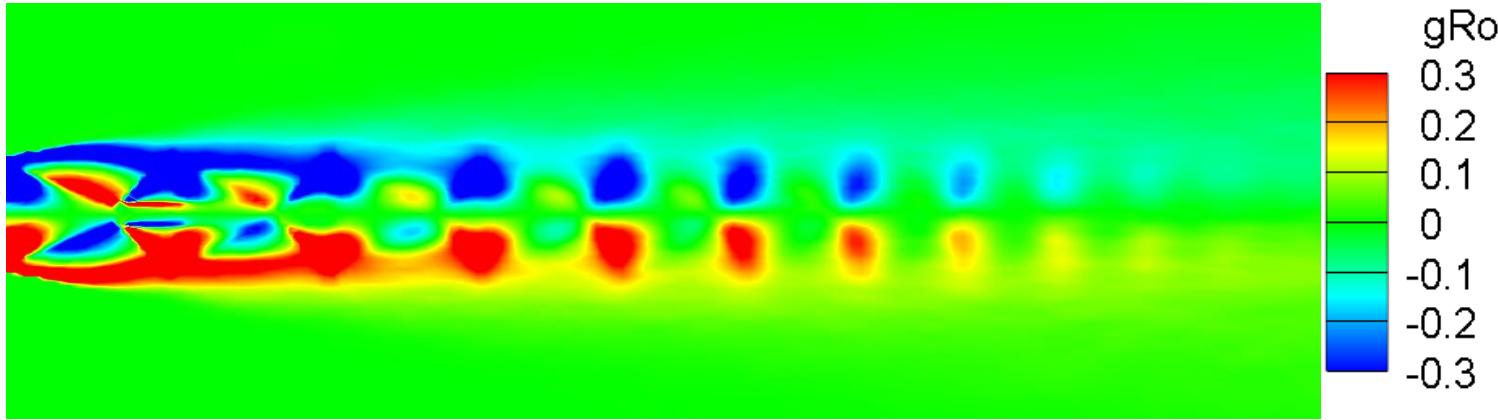
Канал яркости и  
насыщенности.  
Синие области –  
зашкаливание.  
Красные области –  
повышенный интеграл от  
пульсаций градиента  
плотности

При диаметре струи 7 мм не удается количественно оценить уровень пульсаций градиента плотности. Для подробного исследования необходимо провести исследования на более крупномасштабных течениях.

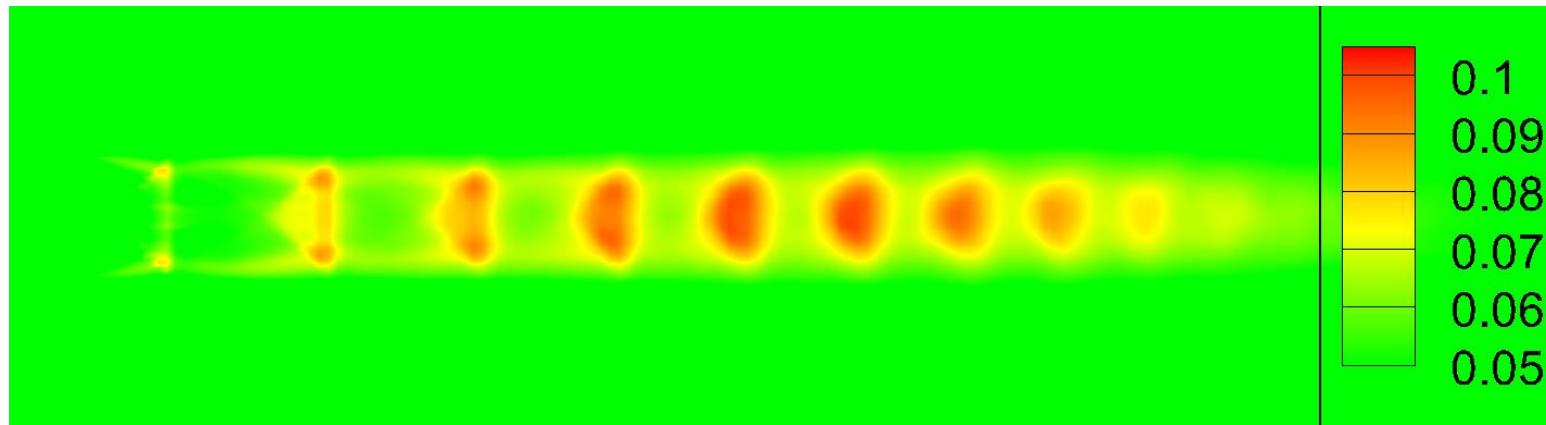
# Выводы

- Создан и успешно внедрён теневой прибор новой конструкции, основанный на разложении света в спектр. Прибор позволяет бесконтактным способом получить количественные данные о интегrale градиента плотности для некоторых типов течений.
- Проведены калибровочные испытания, позволившие определить чувствительность призм с разными углами.
- Прибор позволяет выявить области с повышенным уровнем пульсаций градиента плотности. Для получения количественных данных нужны дальнейшие исследования.
- Создано ПО, позволяющее проводить сопоставление расчёта и эксперимента.

# Спасибо за внимание



Интеграл от вертикальной компоненты градиента плотности



Интеграл от пульсаций плотности