

## 1. Экспериментальные исследования



Общий вид



Phantom MIRO C110

Рис. 1.1 Экспериментальная установка:

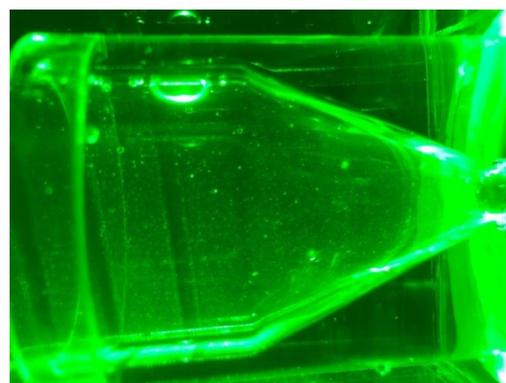
1 – рабочий участок ( $d_{\text{вн}}=0.039$  м), 2 – лазер; 3 – высокоскоростная камера

В 2020 году **за счет средств гранта РФФ куплены:**

- высокоскоростная камера Phantom MIRO C110,
- твердотельный непрерывный лазер SSP-ST-532-NB-5-5-LED-V-AS,
- оптические рельсы для позиционирования камеры и лазера



(а)



(б)

Рис. 1.2. Конфузоры

Конфузоры изготовлены из цельного прутка оргстекла (фирма Gevacril, Италия) – (а).  
Рабочий участок экспериментальной установки крупным планом, подсвеченным лазером – (б)

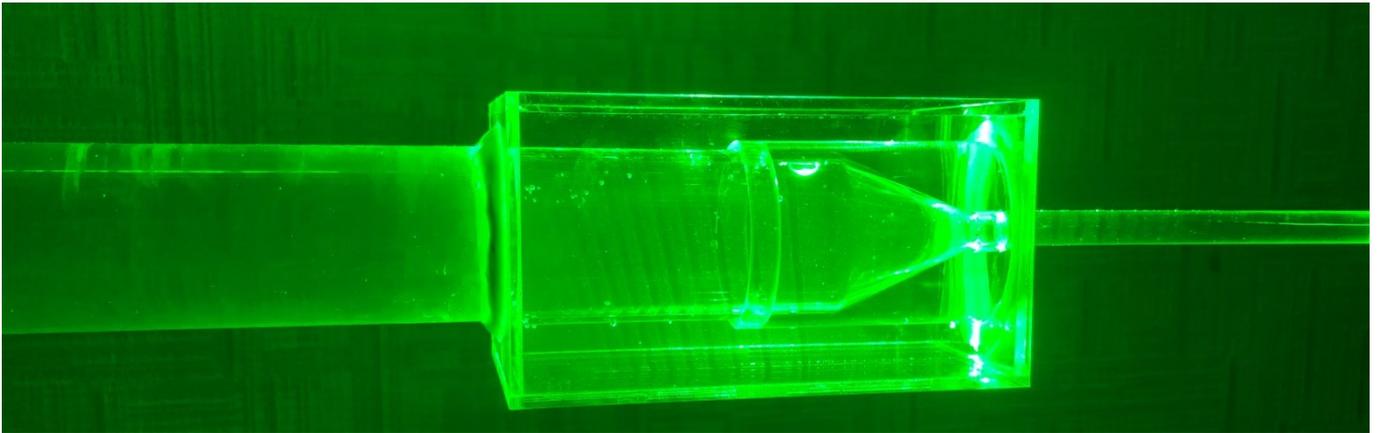


Рис. 1.3. Рабочий участок с коробом. Короб позволяет убрать искажения (в коробе налита аналогичная жидкость)

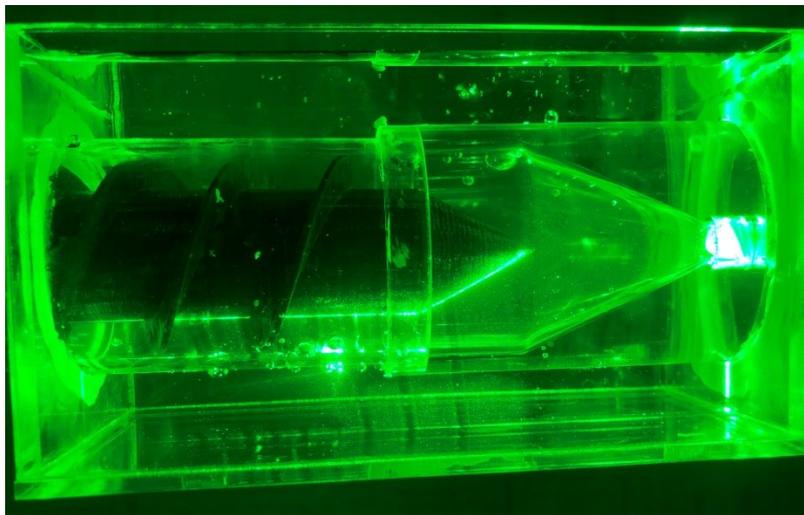


Рис. 1.4. Рабочий участок с шнеком, расположенным вверх по потоку относительно конфузора

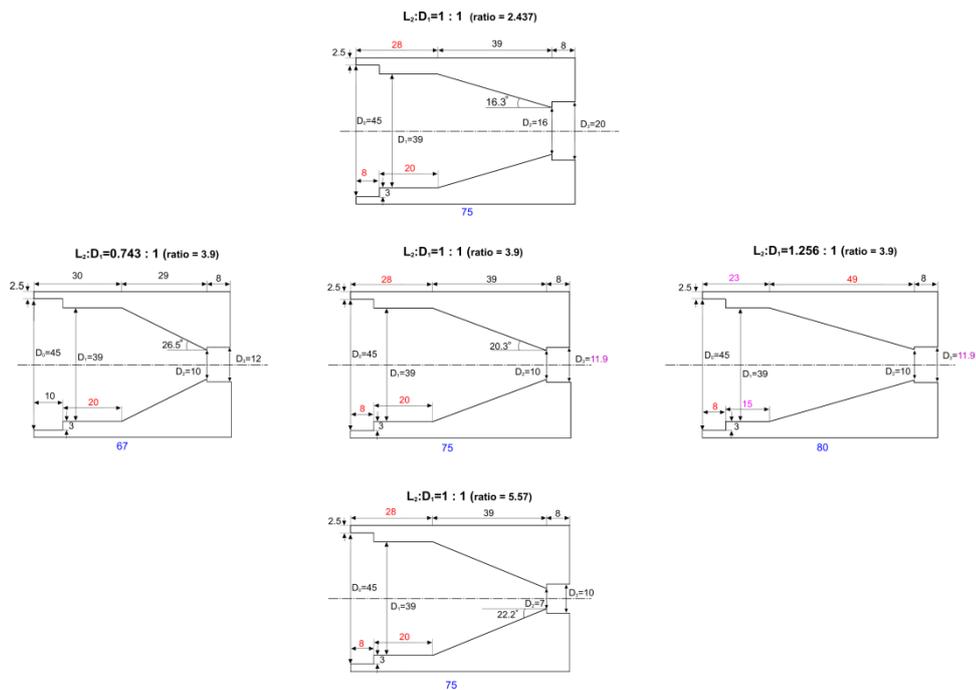


Рис. 1.5. Чертежи конфузоров

## 2. Метод визуализации (FC PAA полиакриламид).

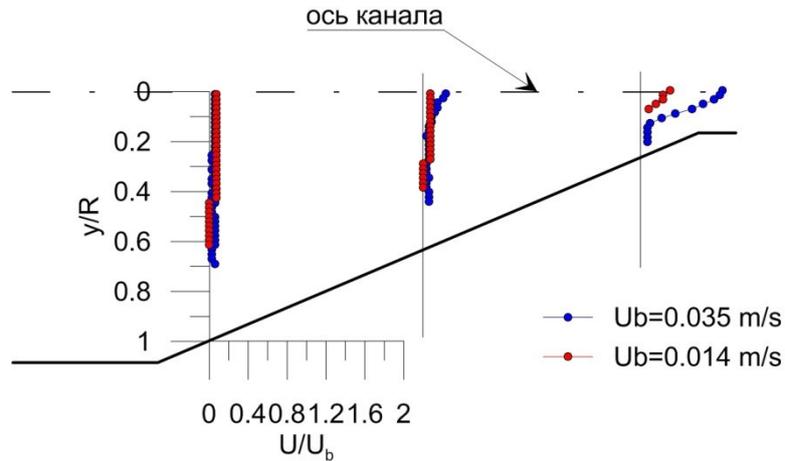


Рис. 2.1. Профили осевой составляющей вектора скорости в сечениях конфузора

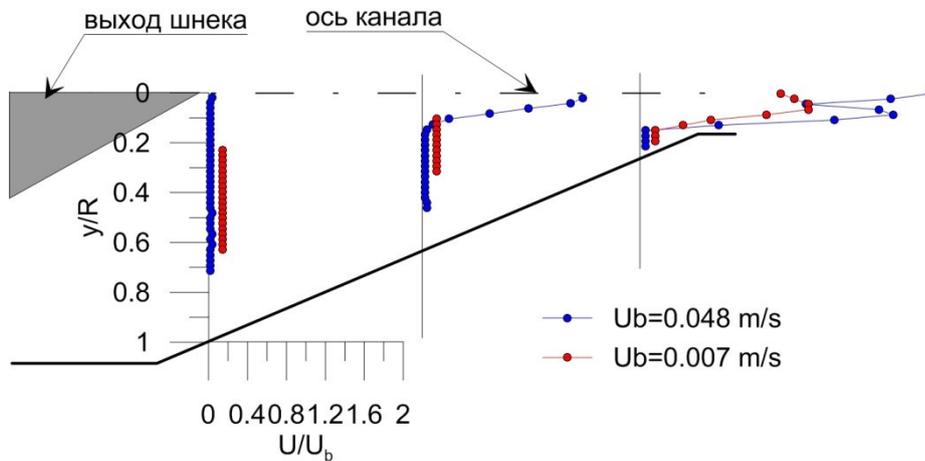


Рис. 2.2. Профили осевой составляющей вектора скорости в сечениях конфузора со шнеком

*Примечание: приготовленный водный раствор полиакриламида удобен для использования SiV метода благодаря наличию мелких частичек, позволяющих отслеживать за их траекторией движения.*

### 3. Математическое моделирование течения вязкоупругой жидкости

#### Реологическое уравнение состояния среды Гиезекуса

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_V + \boldsymbol{\sigma}_N, \boldsymbol{\sigma}_N = 2\mu_N \mathbf{D}, \\ \boldsymbol{\sigma}_V + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}}_V + \frac{\alpha_G \lambda}{\mu_V} \boldsymbol{\sigma}_V \cdot \boldsymbol{\sigma}_V = 2\mu_V \mathbf{D}, \end{cases}$$

где  $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \mathbf{V}^T - \nabla \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial t} + \nabla \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \mathbf{V}^T - \nabla \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\sigma}$  - верхняя конвективная производная тензора  $\boldsymbol{\sigma}$ ;  $\boldsymbol{\sigma}$  - девиатор тензора напряжений;  $\boldsymbol{\sigma}_N, \boldsymbol{\sigma}_V$  - вязкая и упругая составляющие тензора  $\boldsymbol{\sigma}$ ;  $\mathbf{D}$  - тензор скоростей деформаций;  $\mu_N, \mu_V$  - вязкости;  $\lambda$  - время релаксации;  $\alpha_G$  - реологический параметр;  $\mathbf{V}$  - вектор скорости.

#### 3.1. Течение в гладком конфузоре

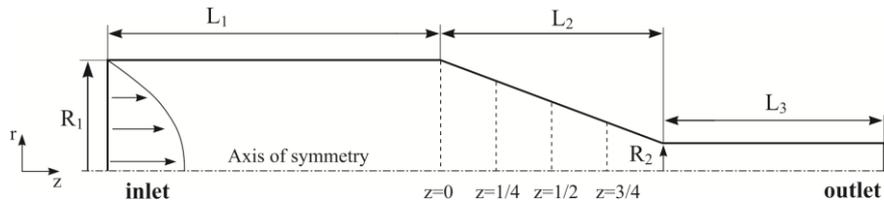


Рис.3.1 Конфузор

$$\rho_f \left( V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr}}{r} \quad (1)$$

$$\rho_f \left( V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Граничные условия:

(на входе)  $V_z = \frac{2V_a}{R_1^2}(R_1^2 - r^2)$ ,  $V_r = 0$ ;

(на стенках канала)  $V_z = 0$ ,  $V_r = 0$ ;

(на выходе) касательные напряжения равны нулю  
здесь  $V_a$  - среднерасходная скорость.

### 3.2. Течение в конфузоре со шнеком

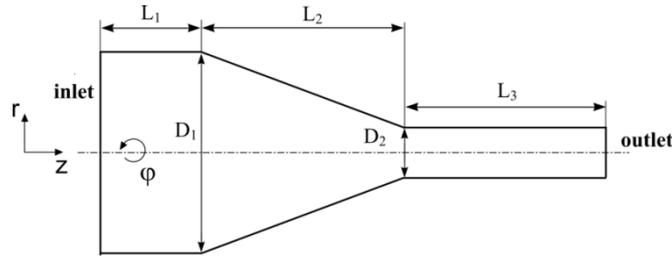


Рис. 3.2. Конфузор №2

$$\rho_f \left( V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \eta_s \left( 2r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \eta_s \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) - 2\eta_s \frac{V_r}{r^2} + \sum_{m=1}^n \left( \frac{\partial \sigma_{rr(m)}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr(m)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz(m)}}{\partial z} - \frac{\sigma_{\varphi\varphi(m)}}{r} \right), \quad (1)$$

$$\rho_f \left( V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{V_r V_\varphi}{r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \eta_s \left( r^2 \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - r V_\varphi \right) + \frac{\partial}{\partial z} \eta_s \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \sum_{m=1}^n \left( \frac{\partial \sigma_{r\varphi(m)}}{\partial r} + 2 \frac{\sigma_{r\varphi(m)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z(m)}}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\rho_f \left( V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \eta_s \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} 2\eta_s \frac{\partial V_z}{\partial z} + \sum_{m=1}^n \left( \frac{\partial \sigma_{rz(m)}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz(m)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{zz(m)}}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

где  $V_r$ ,  $V_\varphi$ ,  $V_z$  are радиальная, окружная и аксиальная составляющие вектора скорости соответственно;  $r, \varphi, z$  цилиндрическая система координат;  $p$  давление,  $\rho_f$  плотность жидкости;  $\sigma_{rr(m)}$ ,  $\sigma_{r\varphi(m)}$ ,  $\sigma_{rz(m)}$ ,  $\sigma_{\varphi\varphi(m)}$ ,  $\sigma_{\varphi z(m)}$ ,  $\sigma_{zz(m)}$  компоненты тензора напряжений ( $\mathbf{T}$ );  $\mathbf{T} = \sigma_{ij} = \sum_{m=1}^n \sigma_m + \sigma_N$ ,  $n$  – число мод,  $\sigma_N = 2\eta_N \mathbf{D}$  ньютоновская составляющая тензора напряжений  $\mathbf{T}$ ;  $\eta_N$  вязкость для  $\sigma_N$ .

Граничные условия

$$V_r = 0, V_\varphi = \frac{K \cdot V_a}{R_1} \cdot r, V_z = \frac{2V_a}{R_1^2} (R_1^2 - r^2) \text{ (на входе)} \quad (5)$$

$$V_r = 0, V_\varphi = 0, V_z = 0 \text{ (на стенках канала)}; \quad (6)$$

Касательные напряжения и давление полагается равным нулю.

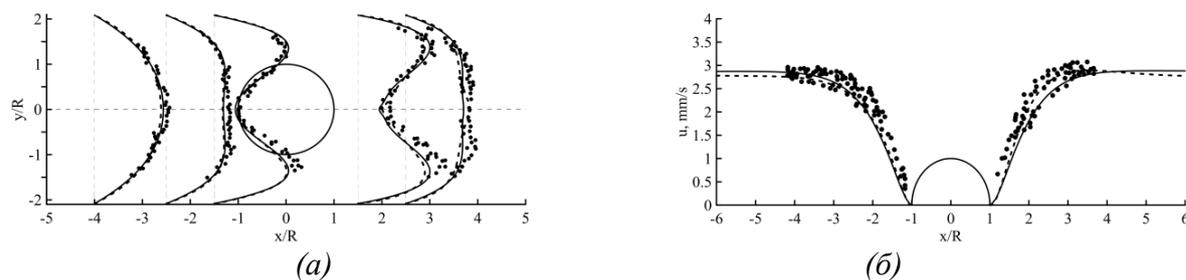
Здесь  $V_a = Q / (\pi R_1^2)$  среднерасходная скорость,  $Q$  - объемный расход (м<sup>3</sup>/с).

Граничные условия (5) представляют идеальную модель, поэтому для численных исследований использована следующая модель:

$$V_\varphi = \omega \cdot r \cdot \left( 1 - \left( \frac{r}{R_1} \right)^{30} \right), \omega = \frac{K \cdot V_a}{R_1} - \text{угловая скорость}. \quad (7)$$

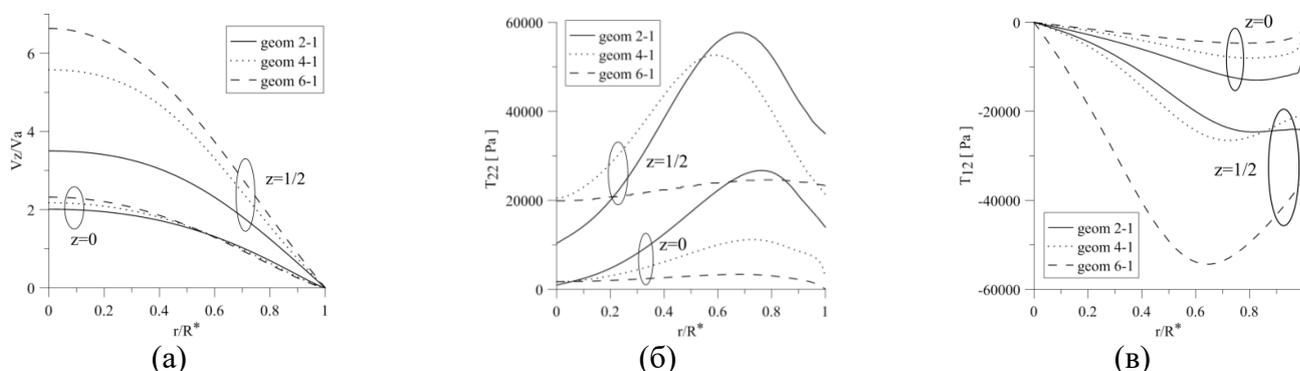
## 4. Результаты численных исследований

### ПРОВЕРКА адекватности двухмодульной модели Гизекуса

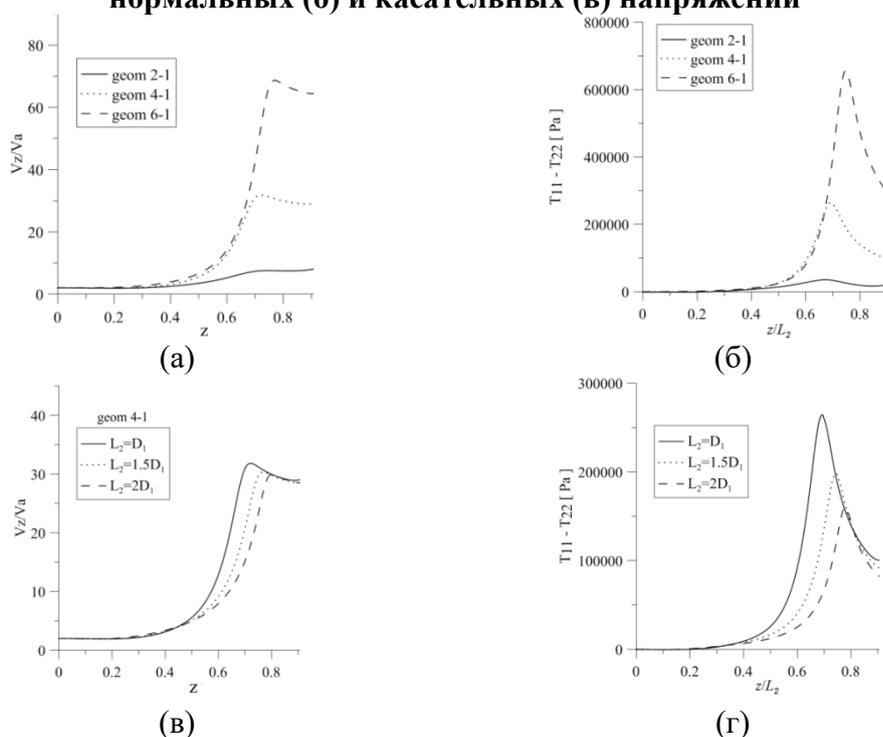


**Рис. 4.1.** Безразмерная осевая составляющая вектора скорости в сечениях (а) и на оси (б) канала: сплошная линия – 4 mode Giesekus ( $\bar{\lambda}=1.74$ ), пунктирная линия – 2 mode Giesekus ( $\bar{\lambda}=0.84$ ), точки – эксперимент ( $V_a=1.975$  mm/s).

### 4.1. Течение в гладком конфузоре



**Рисунок 4.2** Профили безразмерной осевой составляющей вектора скорости (а), нормальных (б) и касательных (в) напряжений



**Рисунок 4.3.** Распределение вдоль оси симметрии безразмерной осевой составляющей вектора скорости (а, в) и первой разности нормальных напряжений (г, д)

## 4.2. Течение в конфузоре со шнеком

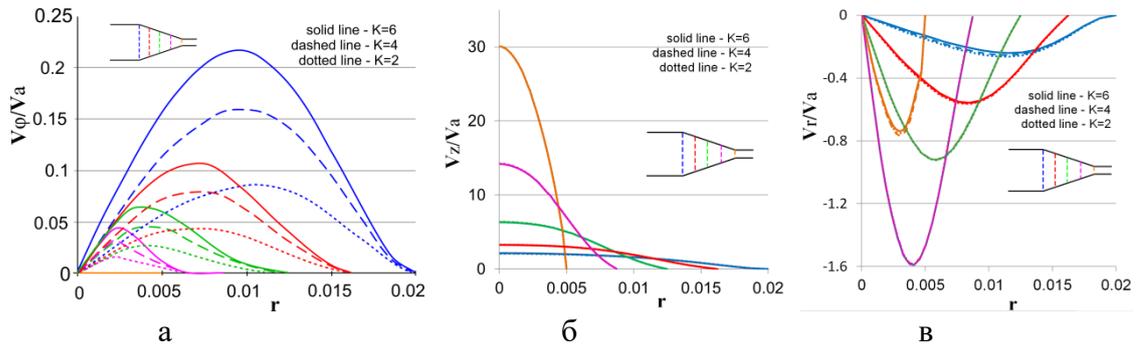


Рисунок 4.4. Распределение безразмерных компонент вектора скорости при различной интенсивности закрученного потока,  $V_a=0.03$  m/s: синий –  $l_2=0$ , красный –  $l_2=1/4$ , зеленый –  $l_2=1/2$ , фиолетовый –  $l_2=3/4$ , оранжевый –  $l_2=1$ .

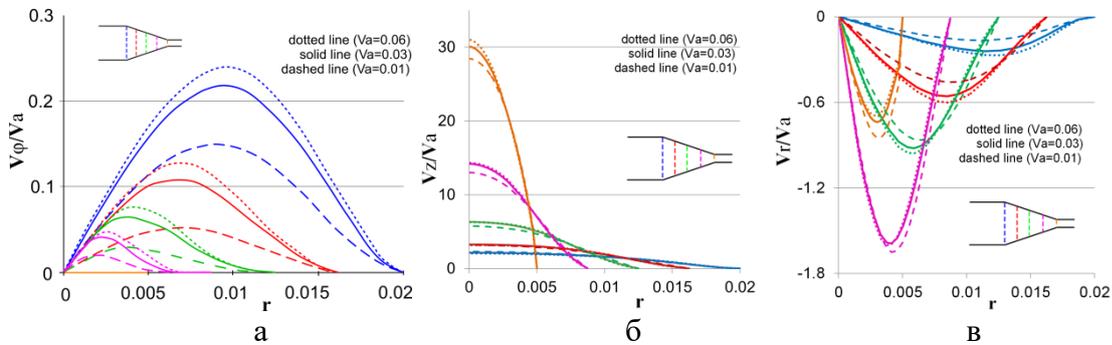


Рисунок 4.5. Распределение безразмерных компонент вектора скорости при различной среднерасходной скорости закрученного потока, ( $K=6$ ): синий –  $l_2=0$ , красный –  $l_2=1/4$ , зеленый –  $l_2=1/2$ , фиолетовый –  $l_2=3/4$ , оранжевый –  $l_2=1$ .

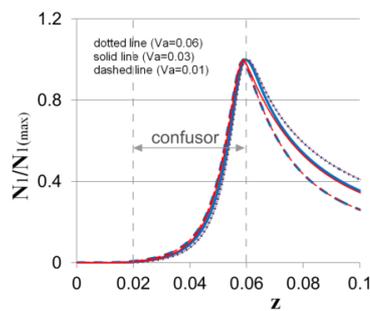


Рисунок 4.6. Первая разность нормальных напряжений вдоль центральной оси для различной интенсивности закрученного потока ( $K$ ) и средней скорости ( $V_a$ ): синий -  $K=4$ , красный -  $K=6$ .

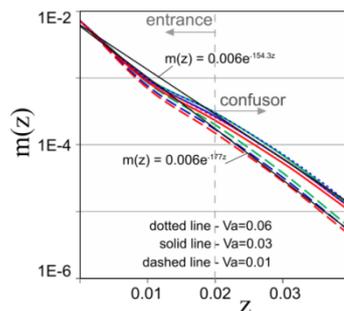


Рисунок 4.7. Интегральный параметр закрутки: красный –  $K=6$ , синий –  $K=4$ , зеленый –  $K=2$

# ICR2020

18TH INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY

-  Home
-  Registration
-  Video conferences
-  Exhibitors
-  Program Overview
-  Short Courses
-  Participant List
-  Tutorial ICR-2020
-  Contacts
-  Logout

FULL NAME	EMAIL
ABEL GASPARD-ROSAS	agaspard-rosas@tainstruments.com
ABHILASH REDDY MALIPEDDI	abhilash@gwu.edu
ABHIMANYU KIRAN	abhimanyu.kiran@iitrpr.ac.in
ABHINENDRA SINGH	abhinendra@uchicago.edu
ABHISHEK SHETTY	abhi.shetty@anton-paar.com
ADAENZE AMAKA UNDIH	aundieh@stanford.edu
ADAM TOWNSEND	adam.k.townsend@durham.ac.uk
ADE OGUNKEYE	846135@swansea.ac.uk
ADEBANJI OLASUPO OLUWOLE	astsupo@yahoo.com
ADRIEN DURAND-PETTIVILLE	ajsd@cin.ufpe.br
AHMAD NAQI	naqi@udel.edu
AHMAD SHAKEEL	a.shakeel@tudelft.nl
AHMAD ZUHEIR BIN ZAIDON	azz22@cam.ac.uk
<b>AIDAR ILDUSOVICH KADYROV</b>	<b>aidarik@rambler.ru</b>
AIJIE HAN	auh389@psu.edu
AKANKSHA GAVENDRA	p20150404@goa.bits-pilani.ac.in
AKBARI	soheil.akbari.1@ulaval.ca
ALAN LUGARINI	alansouza@utfpr.edu.br
ALANNAH SIQUEIRA GUERRERO	alannah.guerrero@lambra.com.br
ALBERT CO	albertco@maine.edu
ALDO SPATAFORA SALAZAR	astefanoss@rice.edu
ALEJANDRA ALVAREZ	avalvarez@jri.cl