

1. Экспериментальные исследования

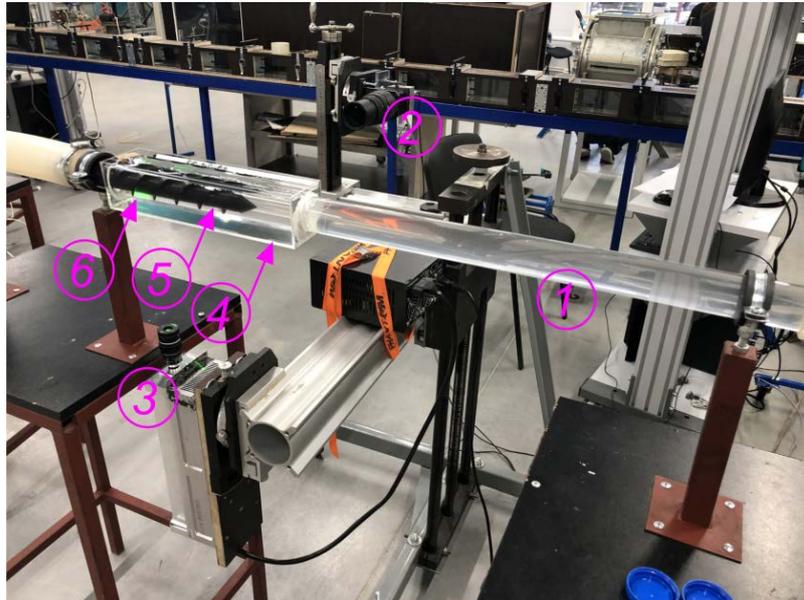


Рис. 1.1 Общий вид экспериментальной установки:

1 – стеклянная труба ($d_{\text{вн}}=0.039$ м), 2 – высокоскоростная камера; 3 – лазер; 4 – короб с дистиллированной водой для устранения оптического искажения; 5 – шнековая вставка; 6 – место подсвечивания лазерным ножом.

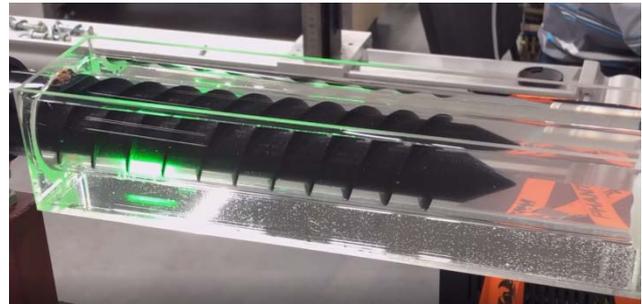
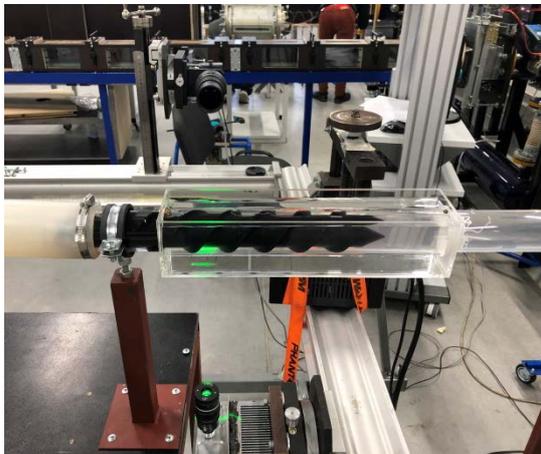


Рис. 1.2. Рабочий участок экспериментальной установки крупным планом.

2. Аprobация метода визуализации на классической задаче обтекания шара вязкоупругой жидкостью (FC PAA полиакриламид).

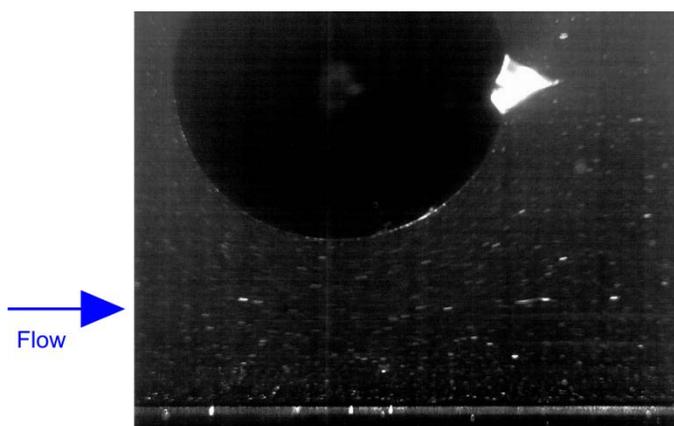
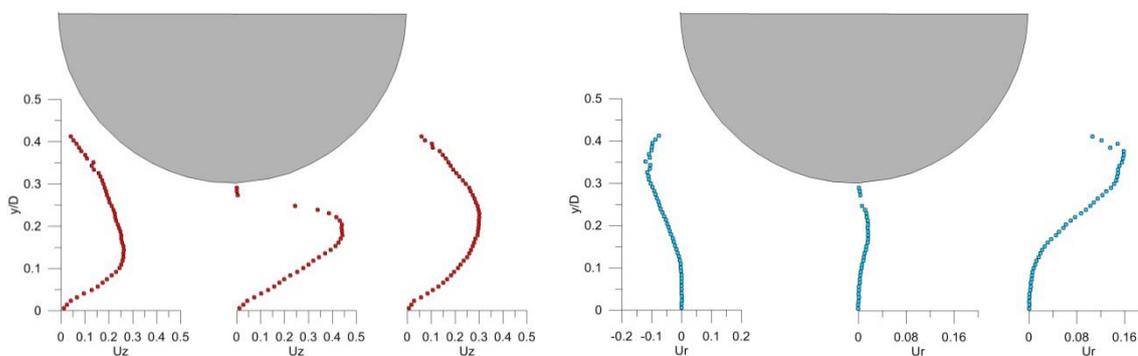


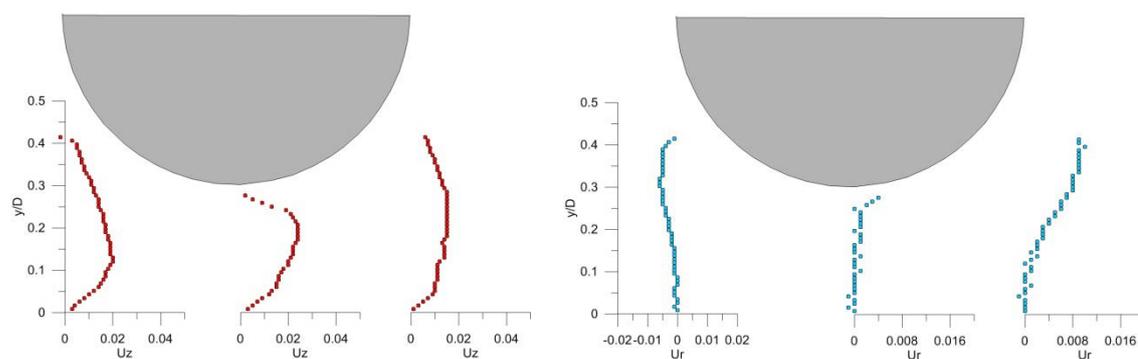
Рис. 2.1. Единичный кадр съемки обтекания шара



Осевая составляющая вектора скорости

Поперечная составляющая вектора скорости

частота съемки 740 Hz



Осевая составляющая вектора скорости

Поперечная составляющая вектора скорости

частота съемки 740 Hz

Рис.2.2 Профили осевой и радиальной составляющей вектора скорости при обтекании шара в круглой трубе

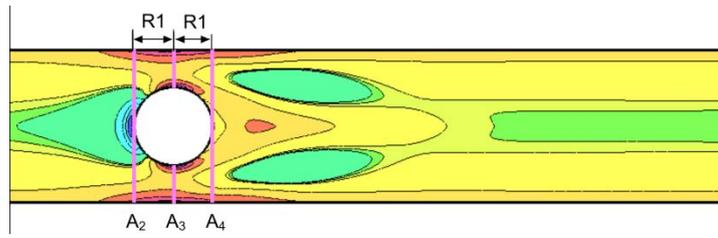
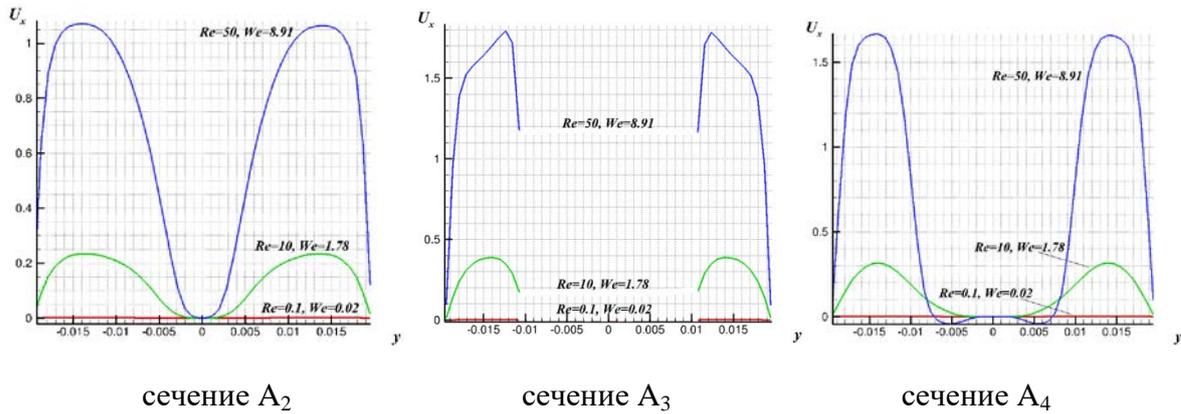
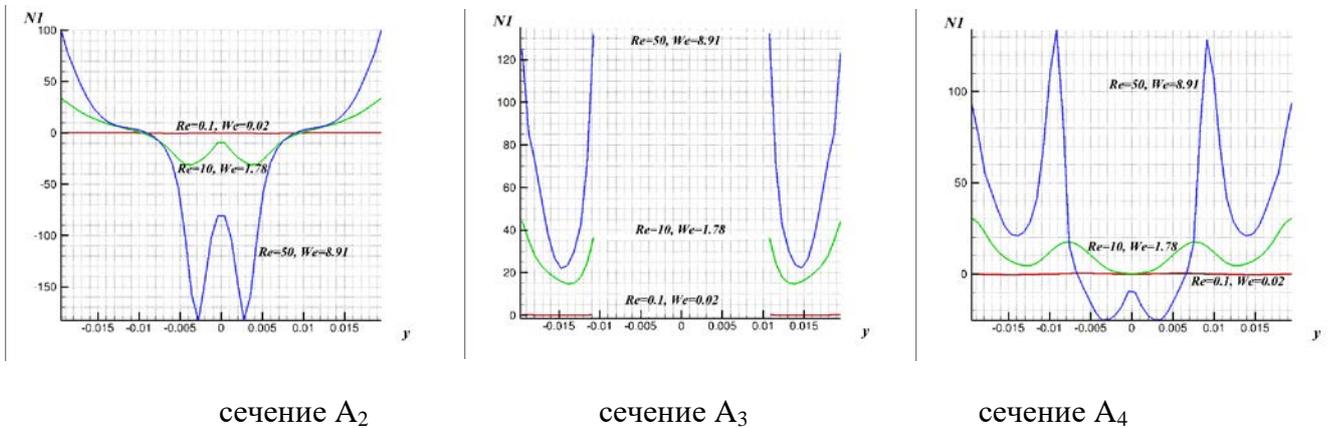


Рис. 3.1. Распределение первой разности нормальных напряжений:

$Re=10, We=1.78$; A_i – сечения канала.



Распределение безразмерной осевой составляющей вектора скорости



Распределение первой разности нормальных напряжений

Рис. 3.2. Численные данные о распределении осевой составляющей вектора скорости и первой разности нормальных напряжений при обтекании шара

4. Визуализация течения вязкоупругой жидкости

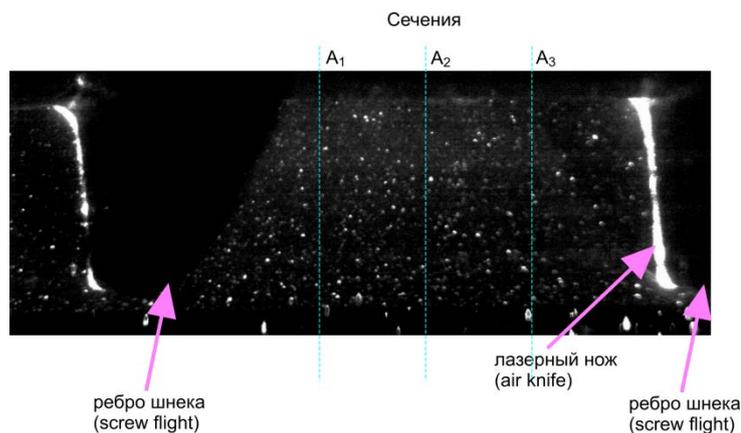


Рис. 4.1. Единичный кадр съемки течения FC PAA между ребрами шнековой вставки

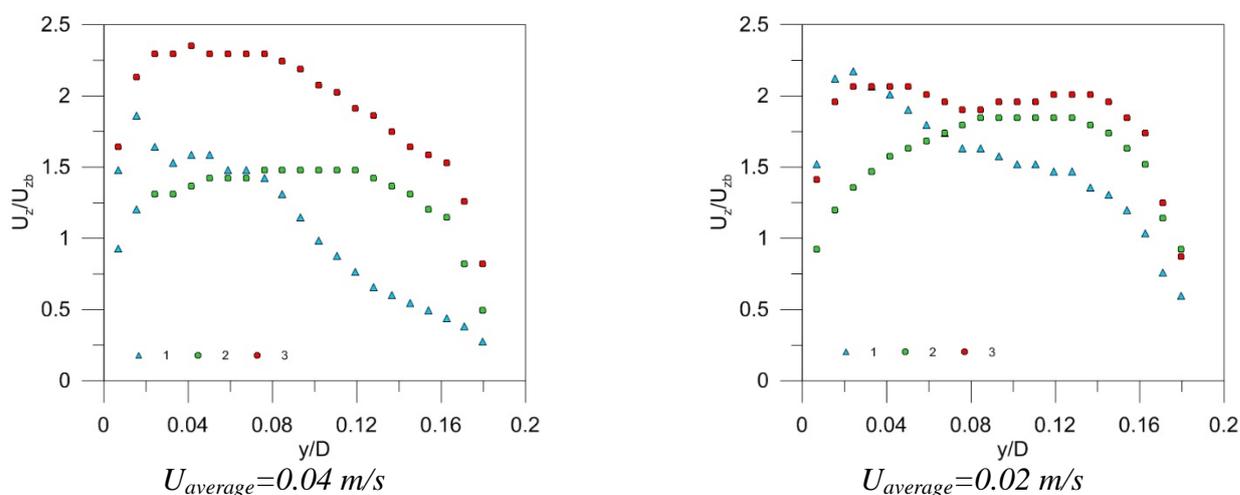


Рис. 4.2. Профили осевой составляющей вектора скорости в сечениях, расположенных между ребрами шнековой вставки ($S/D=1$): 1 – A_3 ; 2 – A_2 ; 3 – A_1

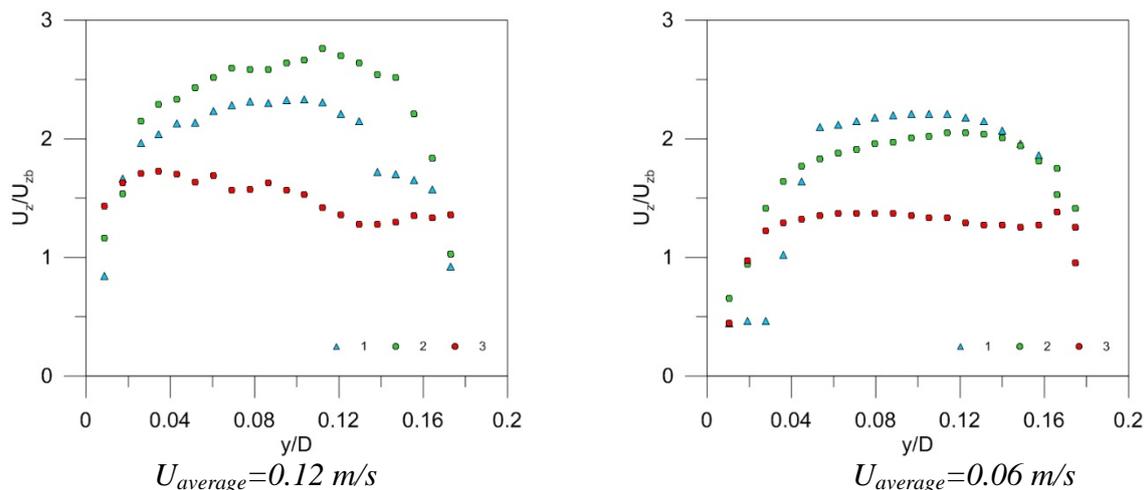


Рис. 4.3. Профили осевой составляющей вектора скорости в сечениях, расположенных между ребрами шнековой вставки ($S/D=2$): 1 – A_3 ; 2 – A_2 ; 3 – A_1

5. Математическое моделирование

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; μ_N, μ_V - вязкости; λ - время релаксации; α_G - реологический параметр; \mathbf{V} - вектор скорости.

В настоящей работе использована следующая **винтовая система координат** ξ^1, ξ^2, ξ^3

$$\begin{cases} x = \xi^1 \cos(\pm \omega \xi^3) - \xi^2 \sin(\pm \omega \xi^3) \\ y = \xi^1 \sin(\pm \omega \xi^3) + \xi^2 \cos(\pm \omega \xi^3), \\ z = \xi^3 \end{cases} \quad (5.1)$$

где x, y, z - декартовая система координат, $\omega = (2\pi)/S$, R - радиус трубы с ленточной винтовой вставкой, S - шаг ленточной вставки (длина части канала, соответствующая повороту ленты на 360 градусов). В (5.1) знак "+" выбирается в случае, когда жидкость течет в сторону, закрученной по часовой стрелке ленточной вставки, а знак "-" - в случае течения, закрученной против часовой стрелки.

Система уравнений переноса количества движения и неразрывности, описывающая стационарное ламинарное течение жидкости Гиезекуса в канале с винтовой симметрией (шнековой вставкой)

$$\text{Re}^* \left(\left(\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} \mp \kappa \eta^2 \frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} \right) v^1 + \left(\frac{\partial v^1}{\partial \eta^2} \mp \kappa \eta^2 \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} \mp 2\kappa v^3 \right) v^2 - \kappa^2 \eta^1 (v^3)^2 \right) =$$

$$= -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^2}{\partial \eta^2} \mp \kappa s_2^3,$$

$$\text{Re}^* \left(\left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} \mp \kappa \eta^1 \frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} \pm 2\kappa v^3 \right) v^1 + \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} \mp \kappa \eta^1 \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} \right) v^2 - \kappa^2 \eta^2 (v^3)^2 \right) =$$

$$= -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^2} + \frac{\partial s_2^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_2^2}{\partial \eta^2} \pm \kappa s_1^3,$$

$$\text{Re}^* \left(\mp \kappa \eta^2 \frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} \pm \kappa \eta^1 \frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} + \left(1 + \kappa^2 \left((\eta^1)^2 + (\eta^2)^2 \right) \right) \frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} + 2\kappa^2 \eta^1 v^3 \right) v^1 +$$

$$+ \text{Re}^* \left(\mp \kappa \eta^2 \frac{\partial v^1}{\partial \eta^2} \pm \kappa \eta^1 \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} + \left(1 + \kappa^2 \left((\eta^1)^2 + (\eta^2)^2 \right) \right) \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} + 2\kappa^2 \eta^2 v^3 \right) v^2 =$$

$$= -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^3} + \frac{\partial s_3^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_3^2}{\partial \eta^2} \mp \kappa s_2^1 \pm \kappa s_1^2 + \kappa^2 \eta^1 s_1^3 + \kappa^2 \eta^2 s_2^3,$$

$$\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} = 0,$$

где $\kappa = \omega R$, $\frac{\partial p^*}{\partial \eta^3} = \text{const}$, $\eta^i = \xi^i / R$ ($i=1,2,3$) - безразмерные переменные; и $v^i = V^i / V^*$ ($i=1,2,3$)

безразмерные контравариантные компоненты скорости; $p^* = PR / ((\mu_N + \mu_V) V^*)$ - безразмерное давление;

$\text{Re}^* = V^* R / (\mu_N + \mu_V)$ - модифицированное число Рейнольдса; V^* - некоторое характерное значение скорости.

Смешанные безразмерные компоненты девизора тензора напряжений $\mathbf{s} = \frac{R}{(\mu_N + \mu_V) V^*} \boldsymbol{\sigma}$ в винтовой

системе координат (5.1) имеют вид

$$s_i^j = 2(1 - \beta) d_i^j + \beta s_{Vi}^j,$$

где $\beta = \frac{\mu_V}{\mu_N + \mu_V}$;

d_i^j - смешанные компоненты безразмерного тензора скоростей деформаций $\mathbf{d} = \frac{R}{(\mu_N + \mu_V) V^*} \mathbf{D}$;

s_{Vi}^j смешанные компоненты безразмерной упругой части $\mathbf{s}_V = \frac{R}{(\mu_N + \mu_V) V^*} \boldsymbol{\sigma}_V$ девизора тензора

напряжений.

6. Вязкозиметрические измерения



Верхнеприводная мешалка Heidolph с мешальником ViscoJet

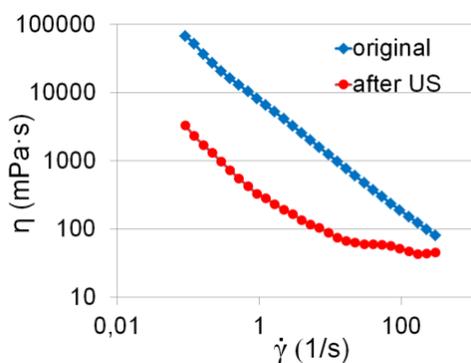


Эффект Вайсенберга

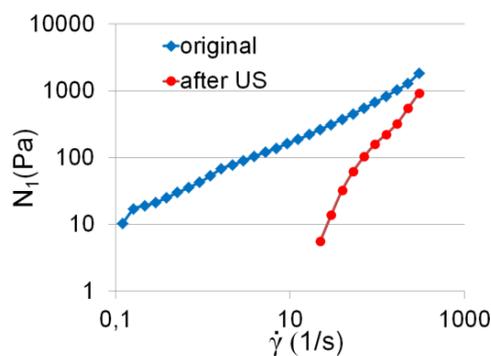


Система плита-плита с верхним кожухом, реометр Physica MCR 102

Рис. 6.1. Приготовление и вязкозиметрические исследования водного раствора полиакриламида высокомолекулярного (FC PAA)

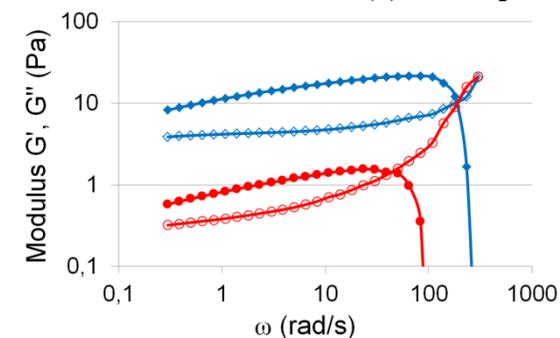


(a)



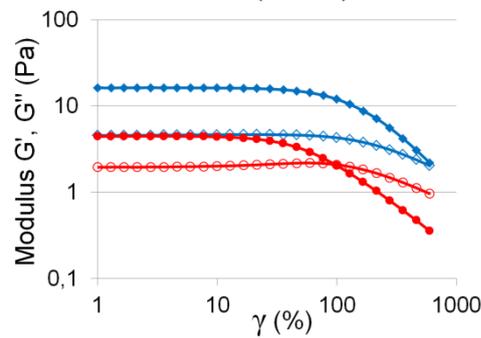
(б)

Рис. 6.2. Зависимость эффективной вязкости (а) и первой разности нормальных напряжений (б) от скорости сдвига для FC PAA (293 К)



◆ G' original ◆ G'' original ● G' after US ● G'' after US

(a)



◆ G' original ◆ G'' original ● G' after US ● G'' after US

(б)

Рис. 6.3. Зависимость модуля упругости (G') и потерь (G'') от угловой частоты (а) и сдвиговой деформации (б); US – ультразвуковая обработка с частотой 24 kHz (293 К)

Измерительная система плита-плита 50 мм

7. Результаты численных исследований

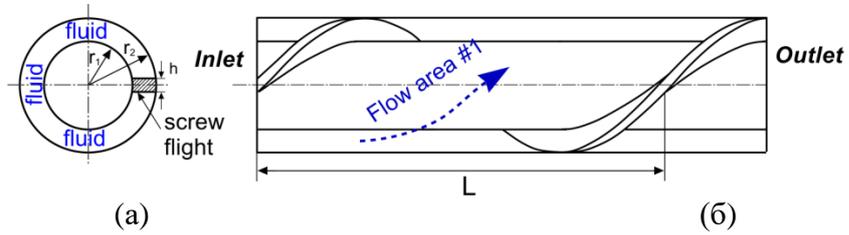


Рис. 7.1. Поперечное (а) и продольное (б) сечение канала с однозаходной шнековой вставкой

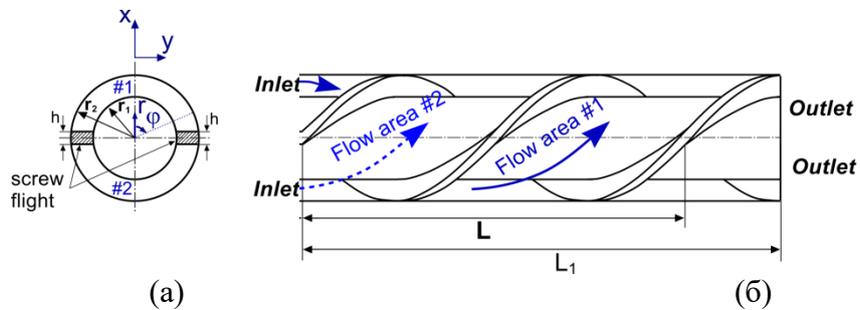


Рис. 7.2. Поперечное (а) и продольное (б) сечение канала с двухзаходной шнековой вставкой

L – шаг винтового канала (длина части канала, соответствующая повороту ребер шнека на 360 градусов)

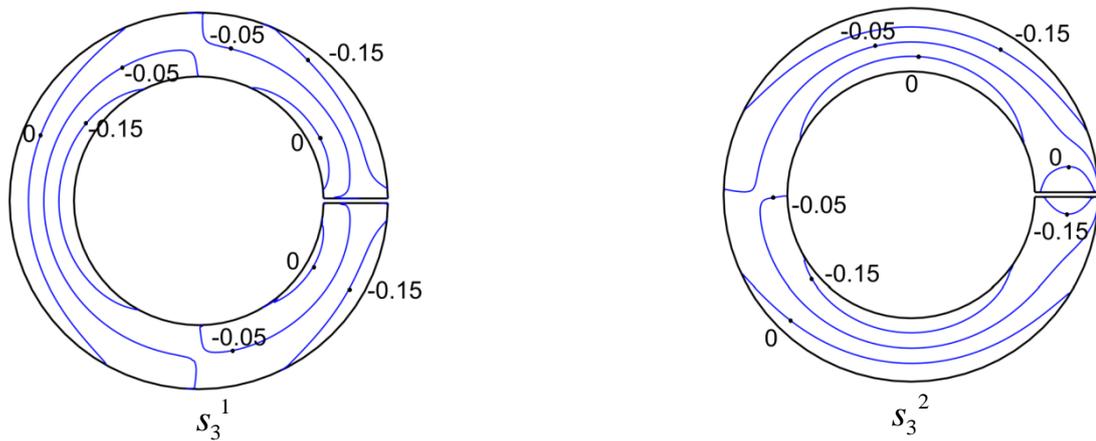


Рис. 7.6. Смешанные безразмерные компоненты девиатора тензора напряжений
(касательные)

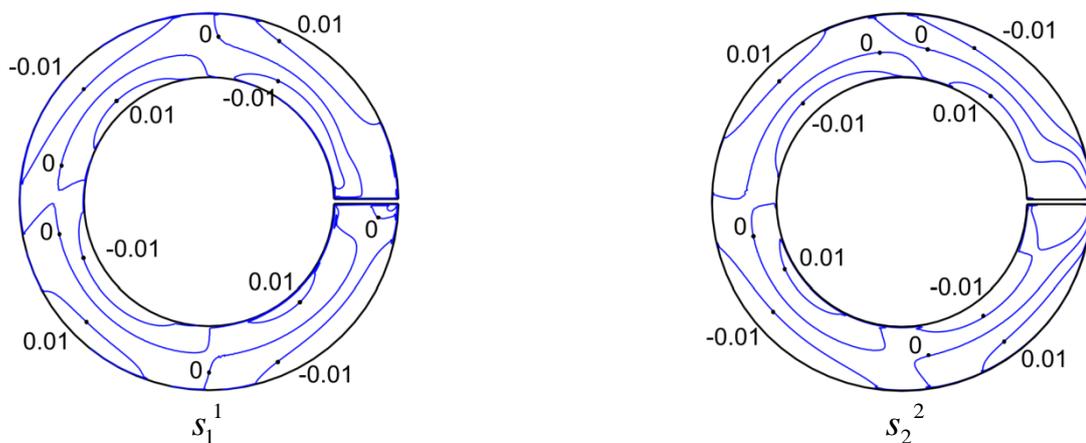


Рис. 7.7. Смешанные безразмерные компоненты девиатора тензора напряжений
(нормальные)

$$s_i^j = 2(1 - \beta)d_i^j + \beta s_{Vi}^j$$

$$\text{Re}_H = 150 (\text{We}_H = 0.4)$$

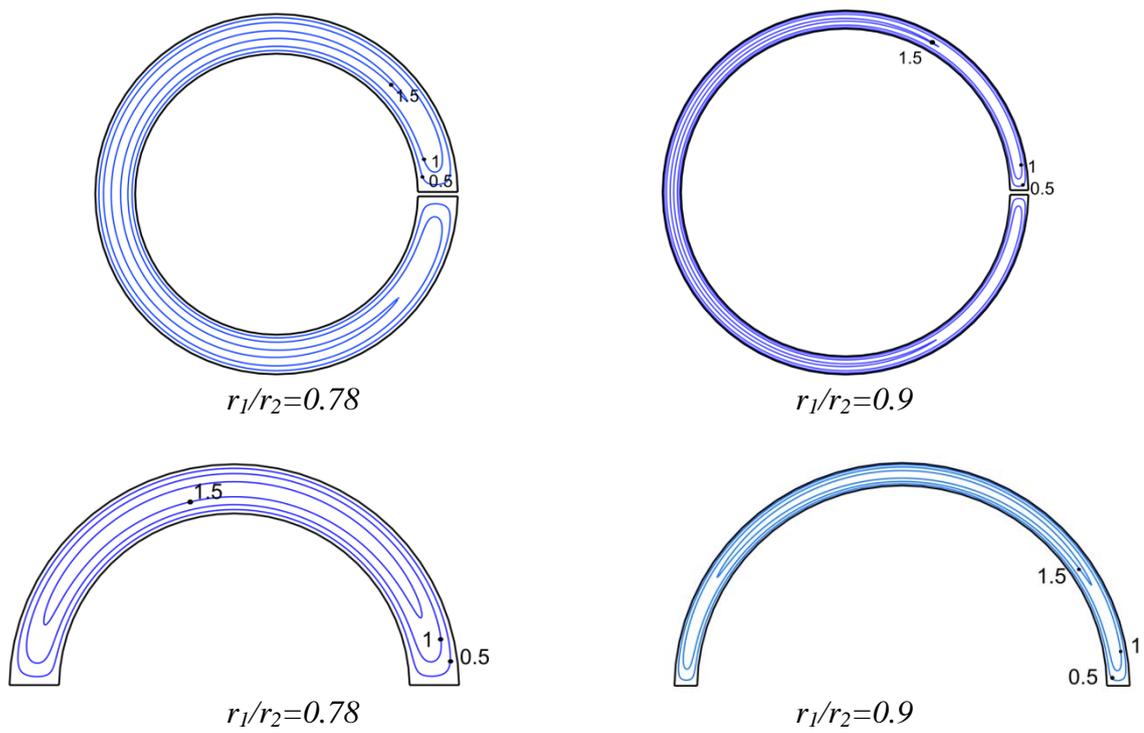


Рис. 7.10. Профили осевой составляющей вектора скорости

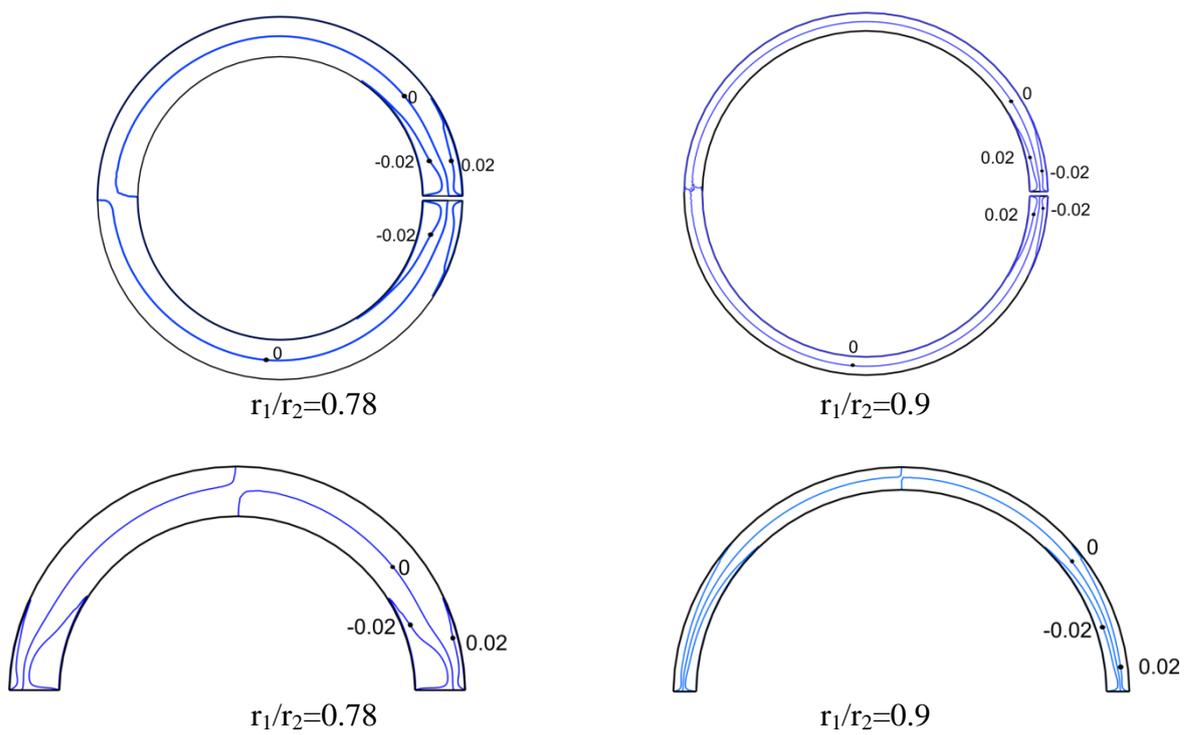


Рис. 7.11. Профили радиальной составляющей вектора скорости

$(S/d_2=3; L=2*S, Re=5, We=0.1)$