

1. Экспериментальные исследования

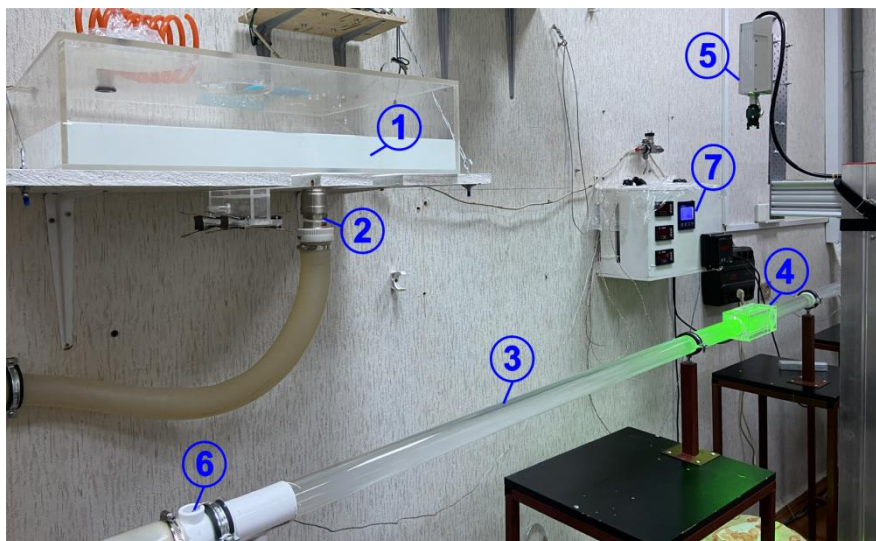


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки (один из вариантов сборки). 1 – емкость с раствором полиакриламида, 2 – кране, 3 – труба из оргстекла, 4 – короб для невилирования оптических искажений со сменными рабочими участками, 5 – лазер, 6 – датчик термопреобразователь сопротивления (ДТС), 7 – устройство обработки сигналов с ДТС (Термодат).

В 2021 году за счет средств гранта РНФ куплены:

- 32 ядерный сервер для 3-х мерного численного моделирования,
- персональный компьютер для ускорения обработки видеоизображений,
- термодат для регистрации температуры,
- вакуумный насос для откачки воздуха из приготовленного водного раствора полиакриламида
- дополнительные полиамидные частицы для визуализации размером до 5мкм,
- опция TrueStrain для реометра, позволяющая сокращать время реологических испытаний в 1,5 раза, что важно в связи незначительным испарением раствора во время тестов,
- расходные материалы для дооснащения экспериментального стенда.

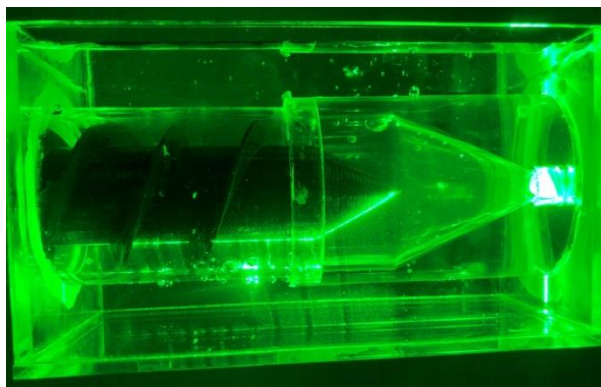


Рис. 2. Рабочий участок с вращающимся шнеком, расположенным вверх по потоку относительно конфузора

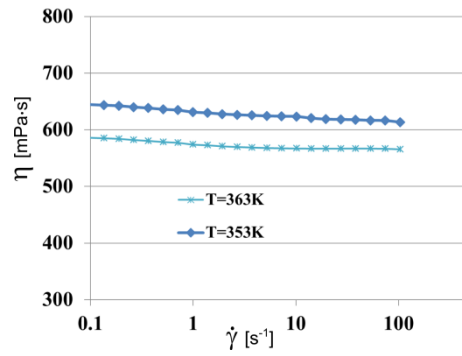


Рис. 3. Зависимость вязкости от скорости сдвига для нефтеполимерной смолы

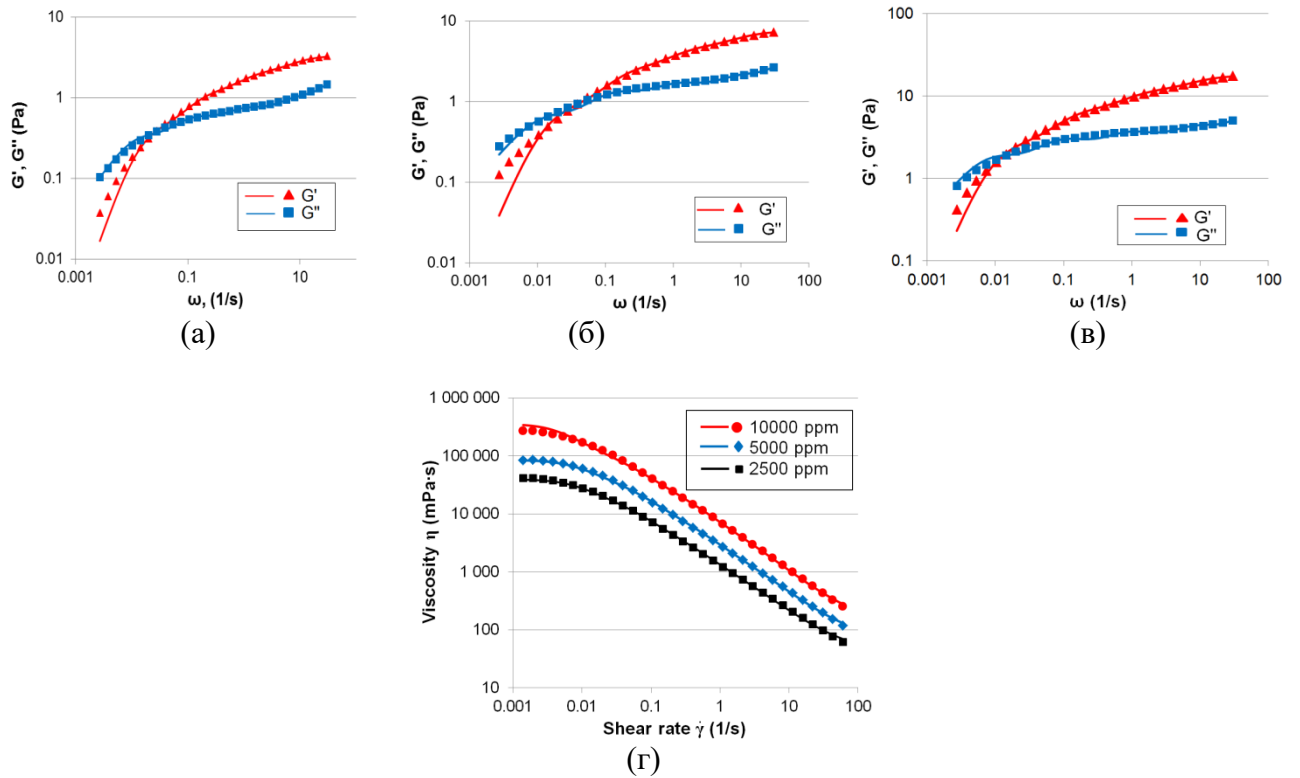


Рис. 4. Зависимость динамических модулей от угловой скорости (а, б, в) и эффективной вязкости от скорости сдвига (г). (растворы полиакриламида, T=293K)

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

3.1. Установившееся ламинарное течение вязкоупругой жидкости в канале с винтовой симметрией

Основная винтовая система координат связана с декартовой системой координат соотношениями

$$\begin{cases} x = \zeta^1 \cos(\zeta^2 / R \pm \omega \zeta^3) \\ y = \zeta^1 \sin(\zeta^2 / R \pm \omega \zeta^3), \\ z = \zeta^3 \end{cases}$$

где $\omega = \frac{2\pi}{S}$, R - большой радиус канала с винтовой шнековой вставкой, S - шаг винтового канала (длина части канала, соответствующая повороту ребра шнека на 360 градусов). Знак "+" или "-" отвечает за ориентацию ребер шнековой вставки.

Система уравнение переноса количества движения и неразрывности в винтовой системе координат в проекциях на естественные направления запишутся как

$$\begin{aligned} & \text{Re}^* \left(\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^1}{\partial \eta^2} v^2 - \eta^1 v^2 v^2 \pm 2\kappa \eta^1 v^2 v^3 - \kappa^2 \eta^1 v^3 v^3 \right) = \\ & = -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^2}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\eta^1} s_2^2 \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^3 + \frac{1}{\eta^1} s_1^1, \\ & \text{Re}^* (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \right) \mp \text{Re}^* \kappa (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) = \\ & = -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^2} + \frac{\partial s_2^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_2^2}{\partial \eta^2} + \eta^1 s_1^2 \mp \kappa \eta^1 s_1^3, \\ & \mp \text{Re}^* \kappa (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \right) + \text{Re}^* \left(1 + \kappa^2 (\eta^1)^2 \right) \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) = \\ & = -\frac{\partial p^*}{\partial \eta^3} + \frac{\partial s_3^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_3^2}{\partial \eta^2} \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^1 \mp \kappa \eta^1 s_1^2 + \kappa^2 \eta^1 s_1^3 + \frac{1}{\eta^1} s_3^1, \\ & \frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta^1} v^1 = 0, \end{aligned}$$

где $\kappa = \omega R$, $\frac{\partial p^*}{\partial \eta^3} = const$, $Re^* = \frac{\rho_f V^* R}{\mu_0}$ - обобщенное число Рейнольдса; $\eta^i = \zeta^i / R (i=1,2,3)$ безразмерные переменные; $v^i = V^i / V^* (i=1,2,3)$ - безразмерные контравариантные компоненты скорости; $p^* = PR / (\mu_0 V^*)$ - безразмерное давление, где V^* и $\mu_0 = \mu_N + \sum_{k=1}^n \mu_{V_k}$ - некоторые характерные значения скорости и вязкости; $s_i^j = 2 \frac{\mu_N}{\mu_0} d_i^j + \sum_{k=1}^n \frac{\mu_{V_k}}{\mu_0} s_{V_{ki}}^j$ - безразмерные смешанные компоненты девиатора тензора напряжений.

Реологическое уравнение «Giesekus» для безразмерного тензора упругих напряжений $\mathbf{s}_{V_k} = \boldsymbol{\sigma}_{V_k} R / (V^* \mu_0)$, записанное для контравариантных компонент примет вид

$$(\mathbf{s}_{V_k})_i^j + \frac{\lambda_k}{\lambda_0} We^* \left(\overset{\nabla}{\mathbf{s}_{V_k}} \right)_i^j + \alpha_k \frac{\lambda_k}{\lambda_0} We^* (\mathbf{s}_{V_k} \cdot \mathbf{s}_{V_k})_i^j = 2 \frac{\mu_{V_k}}{\mu_0} (\mathbf{d})_i^j.$$

$$We^* = \frac{\lambda_0 V^*}{R}, \quad \lambda_0 = \sum_{k=1}^n \lambda_k.$$

3.2. Ламинарное течение вязкоупругой жидкости в конфузоре.

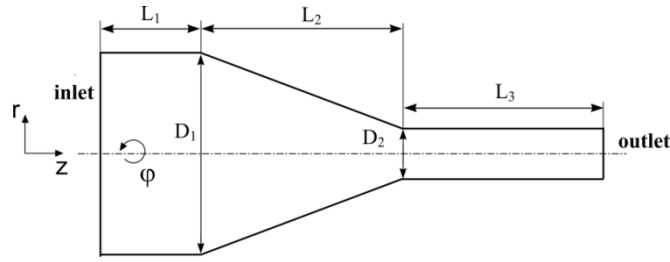


Рис. 5. Геометрия конфузора

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

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

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

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

где V_r , V_φ , V_z are радиальная, окружная и аксиальная составляющие вектора скорости соответственно; r, φ, z цилиндрическая система координат; p давление, ρ_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}); $\mathbf{T} = \sigma_{ij} = \sum_{m=1}^n \boldsymbol{\sigma}_m + \boldsymbol{\sigma}_N$, n - число мод, $\boldsymbol{\sigma}_N = 2\eta_N \mathbf{D}$ ньютоновская составляющая тензора напряжений \mathbf{T} ; η_N вязкость для $\boldsymbol{\sigma}_N$.

Граничные условия

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

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

Касательные напряжения и давление полагается равным нулю.

Здесь $V_a = Q / (\pi R_1^2)$ среднерасходная скорость, Q - объемный расход (м³/с).

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

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

4. Результаты

4.1. Течение в конфузоре

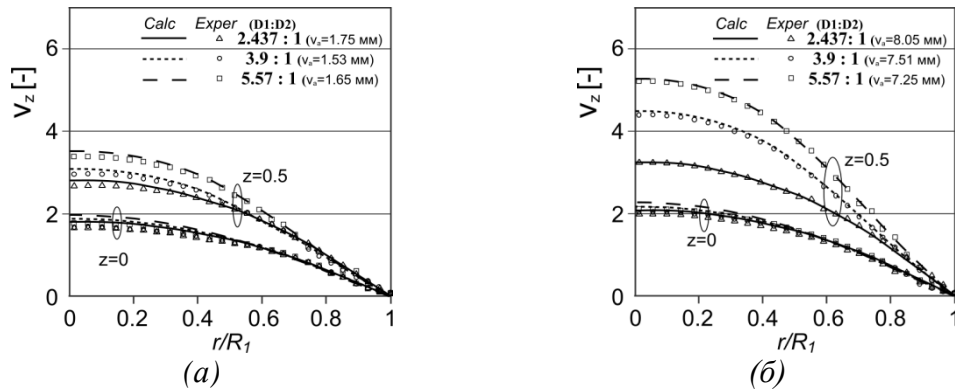


Рис.6. Профили безразмерной осевой составляющей вектора скорости ($T_a=23^\circ\text{C}$, $L_2=1$)

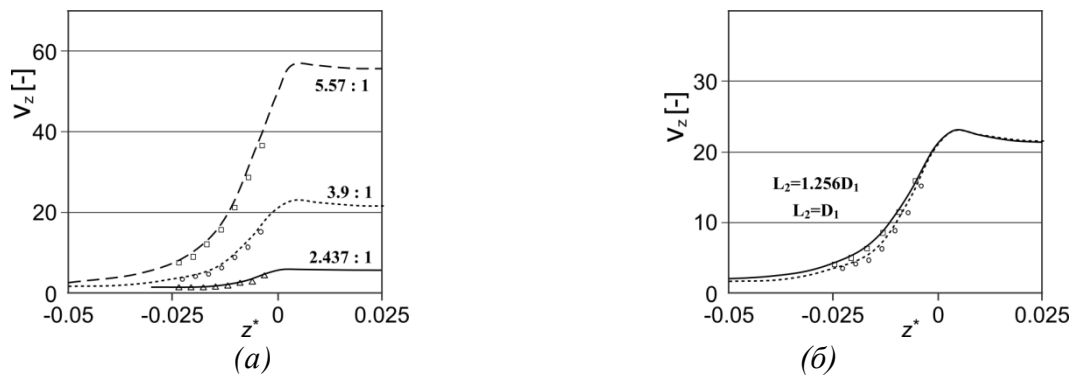


Рис.7. Распределение безразмерной осевой составляющей вектора скорости на оси канала ($T_a=23^\circ\text{C}$): (а) $L_2=D_1$; (б) $D_1: D_2=3.9:1$

4.2. Течение в конфузоре со шнеком

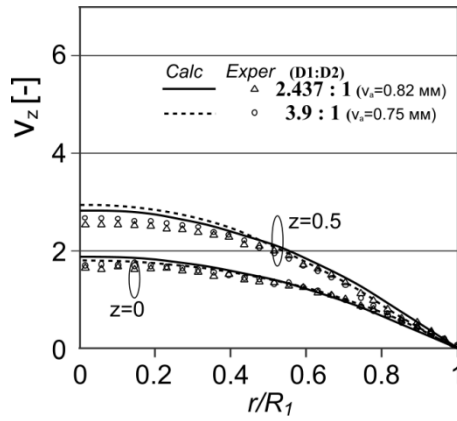


Рис. 8. Профили безразмерной осевой составляющей вектора скорости (скорость вращения шнека 6.28 рад/сек, $T_a=24^\circ\text{C}$):

Участие в конференции

VI Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Севастополь, Республика Крым, Севастопольский государственный университет 22-29 августа 2021 г.

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

Севастополь, Республика Крым, Севастопольский государственный университет 22-29 августа 2021 г.

ПРОГРАММА

Сибирское отделение РАН
 Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН

Российский национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кузнецова СО РАН
 Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
 Севастопольский государственный университет
 Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
 Новосибирский государственный технический университет
 ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН

Российский научный фонд

