

ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ БУРОВОЙ КОЛОНЫ

Платонов Д.В.

Научный руководитель – Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Течение неньютоновских жидкостей в кольцевом канале, в настоящее время, представляет проблему промышленного значения очень широко распространенную в природе и технике. Примером является бурение нефтяных скважин, где циркуляция тяжелого бурового раствора в кольцевом пространстве, окружающем бурильную трубу, позволяет производить бурение с поверхности. Буровые растворы являются обычно характерными неньютоновскими жидкостями типа бингамовских пластиков либо псевдопластиков.

В ходе работы были рассмотрены задачи о течении ньютоновской и неньютоновской жидкостях в кольцевом канале без эксцентриситета.

Все расчёты проводились на пакете программ *σFlow*. Во всех случаях рассматривалось установившееся течение.

Для решения задачи использовались многоблочные сетки. Благодаря тому, что рассматриваемое нами установившееся течение однородно по длине трубы, нет необходимости детализировать сетку в этом направлении. Все приведенные ниже результаты получены на сетке, которая содержала 3 узла по длине трубы.

1. Ламинарное течение ньютоновской жидкости

При решении рассматриваемой задачи были выбраны следующие геометрические размеры: длина трубы 1 м, диаметр внешней трубы 0,25 м, диаметр внутренней трубы 0,11 м. Плотность жидкости была принята 1000 кг/м^3 . Динамическая вязкость равна $0,3535 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

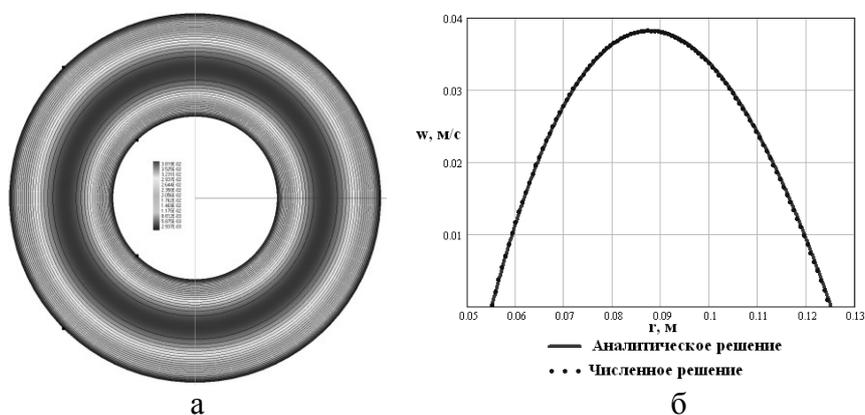


Рис. 1. Изолинии поля (а) и профиль (б) скорости в поперечном сечении ($Re = 10$)

Табл. 1. Перепад давления в трубе

Re	Δp			
	Аналитическое решение	Численное решение		
		Грубая сетка	Детальная сетка	Детальная сетка, со сгущением к стенкам
10	21,633	21,576	21,661	21,677
100	216,330	215,758	216,606	216,776
1000	2163,298	2157,574	2166,063	2168,769

2. Ламинарное течение неньютоновской жидкости

При решении рассматриваемой задачи были выбраны следующие геометрические размеры: длина трубы 1 м, диаметр внешней трубы 0,6 м, диаметр внутренней трубы 0,3 м. Плотность жидкости была принята 1000 кг/м³. В данном разделе были рассмотрены две модели неньютоновской жидкости: модель *Bingham* и модель *Power law*.

Бингамовская жидкость.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma, \quad W(r) = \frac{U \left(\frac{r}{R_2} \right) \cdot \Delta p \cdot R_2^2}{2 \cdot k}, \quad Q = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_{R_1}^{R_2} W(r) \cdot r \cdot dr.$$

Степенная жидкость.

$$\tau = -k \cdot \left(\frac{du}{dr} \right)^n, \quad \Delta p = \left(\frac{Q}{R_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \int_{R_1}^{R_2} U \left(\frac{r}{R_2} \right) \cdot r \cdot dr} \right)^n \cdot \frac{2 \cdot k}{R_2}.$$

где τ - напряжение сдвига; μ , γ , k , n - коэффициенты определяющие вязкость для данной модели; R_2 , R_1 - радиус внешней и внутренней трубы; Δp - перепад давлений в трубе; $W(r)$ - осевая скорость в канале; ρ - плотность жидкости; Q - расход в трубе.

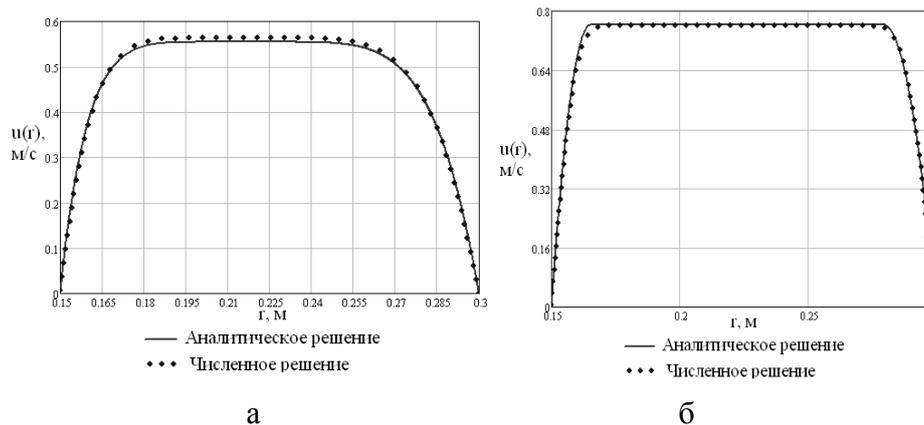


Рис. 2. Профиль скорости (модель *Power law*, $Q=100$ (кг/с) (а), модель *Bingham*, $Q=148,33$ (кг/с) (б))

Табл. 2. Результаты расчетов для модели *Bingham*

Q (кг/с)	τ	k	Δp		Ошибка (%)
			аналитическое решение	численное решение	
29,08	40	0,15	600	666	11
148,33	40	0,15	700	654	6,6

Табл. 3. – Результаты расчетов для модели *Power law*

Q (кг/с)	n	k	Δp		Ошибка (%)
			аналитическое решение	численное решение	
10	0,2	0,15	2,675	2,707	1,2
100	0,2	0,15	4,239	4,297	1,37

3. Турбулентное течение ньютоновской жидкости

Для данной задачи аналитического решения не существует, и результаты расчётов можно сравнить с экспериментом и построенными на его основе корреляциями.

Корреляция №1

$$\Delta p_T = \xi_k \cdot \frac{l}{d_g} \cdot \left(\rho w_b^2 / 2 \right)$$

$$\xi_0 = 0.316 \cdot \text{Re}^{-0.25}$$

$$\xi_k = \left(0.02 \frac{d_1}{d_2} + 0.98 \right) \left(\frac{1}{\xi_0} - 0.27 \frac{d_1}{d_2} + 0.1 \right)$$

Корреляция №2

$$\xi_k = \xi_0 \left[\frac{1 - \Theta}{1 + \left(1 - \frac{(\Theta)^2}{\ln(\Theta)^2} \right)} \right]^{0.62} \cdot (1 + 0.04 \cdot \Theta)$$

$$\Theta = \frac{d_1}{d_2}$$

Корреляция №3

$$\Delta p = \xi_k / \left[\frac{d_g}{2 \rho w_b^2} \right]$$

$$\xi_k = 0.36 \cdot (\text{Re})^{-0.39}$$

где d_g – гидравлический диаметр, w_b – средняя объёмная скорость, ρ – плотность жидкости, Re – число Рейнольдса.

При решении рассматриваемой задачи были выбраны следующие геометрические размеры: длина трубы 1 м, диаметр внешней трубы 0,0403 м, диаметр внутренней трубы 0,0201 м. Расчёты проводились на известных двухпараметрических моделях турбулентности: k-е стандарт, M-SST модель и модель k-е стандарт с модификацией Chen.

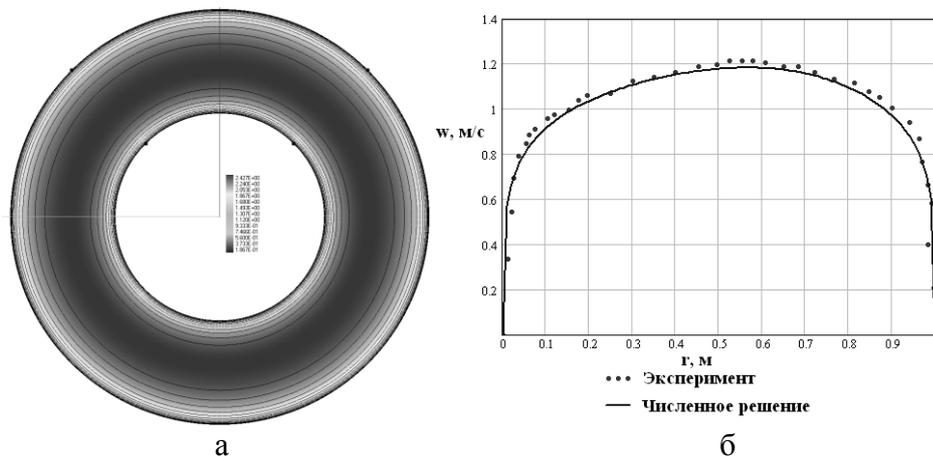


Рис. 3. Изолинии поля (а) и профиль (б) скорости в поперечном сечении ($\text{Re} = 26600$)

Табл. 4. Перепад давления в трубе

Модель турбул.	Численное решение			Корреляция №1	Корреляция №2	Корреляция №3
	k-ε	M-SST	Chen			
$Re = 10^4$	8,006	7,885	7,789	7,738	8,052	7,842
$Re = 10^5$	429,038	406,599	419,984	442,284	460,248	446,271
$Re = 10^6$	260,599	269,628	255,987	285,819	297,429	284,488

4. Турбулентное течение в канале с эксцентриситетом и вращением внутренней трубы

Для данного течения проведено сопоставление расчета с экспериментальными данными.

На рисунке 5 приведено сравнения расчетных и экспериментальных профилей скорости в самом широком сечении кольцевого канала.

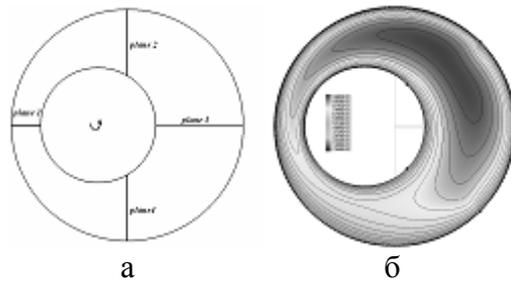


Рис. 4. Схема кольцевого канала (а) и изолинии поля (б) скорости в поперечном сечении ($Re=26600$)

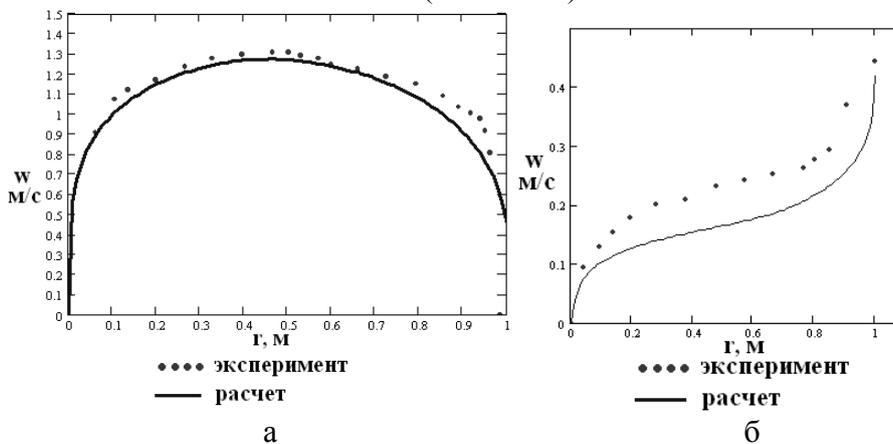


Рис. 5. Профиль осевой скорости (а) и тангенциальной скорости (б) в кольцевом канале (сечение plane3)

Результаты сопоставления численного и аналитического решений говорят о очень хорошем согласовании, как по форме профиля скорости, так и по величине перепада давления. В целом отклонение результатов численного моделирования от аналитических либо экспериментальных данных не превысило 1-2 процента, за исключением результатов моделирования течения неньютоновской жидкости, модели *Bingham*. Это физически очень сложное течение и требует более детальной сетки.

Данное обстоятельство свидетельствует о том, что численное моделирование с успехом может применяться для изучения неньютоновских течений в научных исследованиях, так и во множестве различных инженерных приложениях.