

УДК 536.25

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРОТЯЖЁННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ГРАДИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2012 А. С. Хорошев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Исследуется свободно-конвективное движение жидкости в длинном вертикальном цилиндре (удлинение от 60 до 200). Движение смоделировано средствами CFD (вычислительная гидродинамика) в пакете Ansys CFX. Проанализировано влияние удлинения и перепада температур на стенке цилиндра на интенсивность конвективного течения. Выявлено три типа конвективного движения в зависимости от числа Рэлея (в диапазоне от  $3 \cdot 10^3$  до  $4 \cdot 10^4$ ).

*Конвективное течение, конвекция в вертикальной скважине, антисимметричный поток, моделирование в Ansys CFD.*

### Введение

В последнее время получили широкое развитие методы гидродинамических исследований (ГДИ) нефтяных скважин с применением замеров давлений по стволу скважины. Это связано с появлением высокоточных и надёжных глубинных манометров. Получаемые по результатам ГДИ результаты часто не согласуются с математическими моделями, применяемыми для описания процессов, происходящих в скважине.

### Постановка задачи

Исследуется свободно-конвективное движение жидкости в длинном вертикальном цилиндре (удлинение от 60 до 200), которое смоделировано в пакете Ansys CFX.

Граничные условия (рис. 1):

1. Условие прилипания на стенках (скорость на стенке равна нулю).

2. Торцы предполагаются теплоизолированными.

3. На стенках поддерживается температура  $T_w(z) = T_0 - \Delta T \cdot z/h$ , где  $\Delta T$  – перепад температуры между основанием и вершиной цилиндра (в направлении прооси  $z$ ),  $\Delta T = const$ ,  $T_0$  – температура стенки у основания цилиндра.

4. Объём замкнутый.

5. Диаметр цилиндра – 5 см.

Основные уравнения решаются методом конечных объёмов.

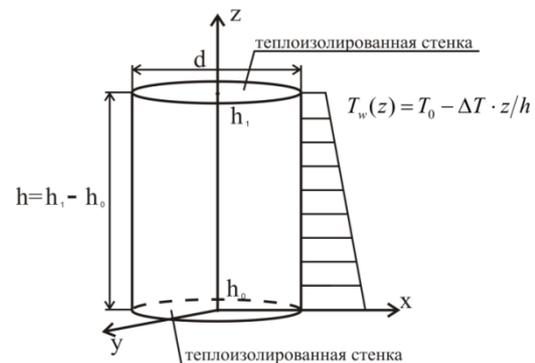


Рис. 1. Координаты и граничные условия

### Численное моделирование конвективного течения в цилиндре большого удлинения

Для анализа влияния температуры и удлинения цилиндра на характер течения и теплообмена проведено моделирование конвекции для перепадов температур 0,1, 0,3, 0,9 °C и удлинений цилиндра 60, 80, 100 и 200. Основным безразмерным параметром конвективного движения является число

Рэлея:  $Ra = \frac{\beta g d^4 \gamma}{\nu \chi}$ , где  $\beta = \frac{\partial(\ln \rho)}{\partial T}$  –

коэффициент термического расширения,  $d$  – диаметр цилиндра,  $\gamma = \frac{\partial T}{\partial z}$  – вертикальный

градиент температуры,  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  –

коэффициент кинематической вязкости,

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad - \quad \text{коэффициент}$$

температуропроводности,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c_p$  - теплоёмкость при постоянном давлении,  $\rho$  - плотность жидкости. Расчёты выполнены для числа Рэлея от  $3 \cdot 10^3$  до  $4 \cdot 10^4$ . Определено критическое число Рэлея начала конвективного движения. В табл. 2 представлены значения чисел Рэлея и максимальной вертикальной скорости  $V_z^{\max}$ . Анализ полученных результатов позволяет выделить три типа течения. Первый тип - отсутствие движения ( $\Delta t = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Второй тип (рис. 4) - упорядоченное винтовое движение ( $\Delta t = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) со сменой направлений закрутки. Можно говорить о случайности направления закрутки, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, описанными в литературе [1]. Шаг спирали линии тока (и изовеллы) примерно постоянен.

Третий тип - сложное движение (рис. 4,  $\Delta t = 0,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Можно выделить ядро, поток в котором извивается и, постоянно приближаясь к боковой стенке цилиндра, «отскакивает» в противоположную сторону. Течение в противоположном направлении «обволакивает» это ядро. Его изовеллы представляют собой подобие сетки с очень крупной ячейкой. При данном течении появляются ячейки конвекции

Таблица 1. - Основные параметры конвективного течения для различных удлинений и перепадов температур

		Удлинение		
			60	80
Перепад температур, $^\circ\text{C}$	0,1	$Ra$	4039	3029
		$V_{\max}$ , м/с	$8 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$
	0,3	$Ra$	12116	9087
		$V_{\max}$ , м/с	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
	0,9	$Ra$	36347	27261
		$V_{\max}$ , м/с	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
		Удлинение		
			100	200
0,1	$Ra$	2423	1211	
	$V_{\max}$ , м/с	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	
0,3	$Ra$	7269	3634	
	$V_{\max}$ , м/с	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	
0,9	$Ra$	21808	10904	
	$V_{\max}$ , м/с	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	

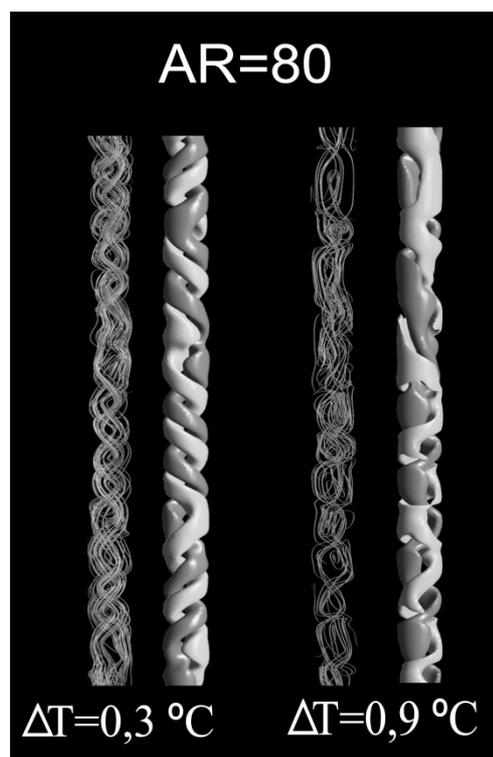


Рис. 4. Линии тока и изовельлы равной вертикальной составляющей вектора скорости для цилиндра удлинением 80 и двух перепадов температур

На рис. 5 представлены графики зависимости среднего по сечению значения модуля вертикальной составляющей вектора скорости  $|\vec{V}_z|^{срeдн}$  от безразмерной высоты цилиндра  $z/h$  для семи значений чисел Рэлея. Видно, что для чисел Рэлея 7269, 9087 и 12116 при значении  $z/h$  от 0,25 до 0,75 имеет место «полка», т.е. скорость  $|\vec{V}_z|^{срeдн}$  постоянна. Для чисел Рэлея 21808, 27262 и 36348 наблюдаются колебания значений  $|\vec{V}_z|^{срeдн}$ , что говорит о периодической смене интенсивности потока в вертикальном направлении. Этот факт дополнительно подтверждает наличие ячеек конвекции. Следует отметить, что восходящий и нисходящий потоки меняют свой вид с изменением высоты цилиндра. Переход от первого типа движения ко второму происходит при  $Ra=3000$ . Точка перехода от второго типа к третьему значительно более размыта и находится в районе  $Ra=20000$ .

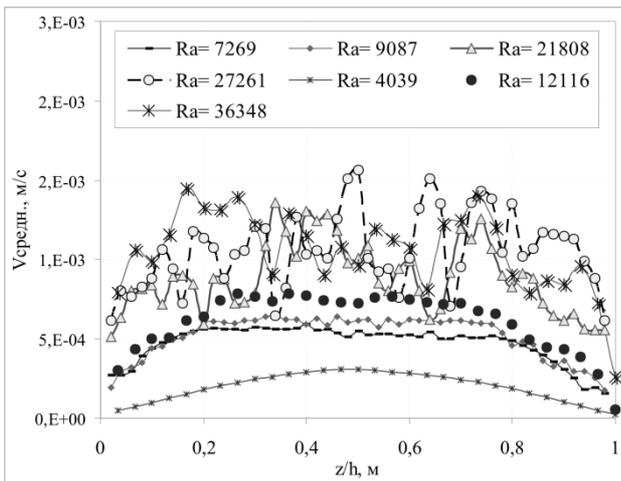


Рис. 5. Зависимость среднего по сечению значения модуля вертикальной составляющей вектора скорости  $\left| \vec{V}_z \right|^{ср}$  от высоты цилиндра  $z$

### Библиографический список

1. Остроумов, Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи [Текст] / Г.А. Остроумов М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. С. 45-65.

## NUMERICAL STUDY OF FREE CONVECTION IN LONG VERTICAL CYLINDER AT CONSTANT VERTICAL GRADIENT OF TEMPERATURE ON LATERAL SURFACE

© 2012 A.S. Khoroshev

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

Buoyancy-induced flow of water in the long vertical cylinder is studied. CFD (Computational Fluid Dynamics) tools (Ansys CFX) is used. Influence of aspect ratio and difference of temperatures on wall of the cylinder on intensity of buoyancy-induced flow is analysed.

*Convection flow, convection in the vertical well, antisymmetric stream, modeling in Ansys CFD.*

### Информация об авторе

**Хорошев Александр Сергеевич**, аспирант кафедры аэрогидродинамики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khoroshev-aleksandr@yandex.ru. Область научных интересов: гидродинамика.

**Khoroshev Aleksandr Sergeevich**, post-graduate student of aerohydrodynamics department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: khoroshev-aleksandr@yandex.ru. Area of research: hydrodynamics.