МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

VI Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики»

16–18 ноября 2016 г., Томск



Издательство Томского университета
2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКРУТКИ НА ГИДРОДИНАМИКУ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Н.И. Гичёва, Е.А. Дьяков

Представлено численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса жидкости в вихревой камере химического реактора с целью нахождения оптимальных параметров реактора для получения равномерного слоя вещества на подложке. Достоверность расчётов подтверждена сопоставлением различных способов решения, а также сравнением с известными аналитическими решениями. Исследовано влияние закрутки на равномерность распределения температуры и массы в вихревой камере.

RESEARCH OF THE ROTATION EFFECT UPON THE HYDRODYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSPORT IN A CHEMICAL REACTOR

N.I. Gicheva, E.A. Dyakov

In this paper a physical and mathematical model of fluid motion and heat transfer in a chemical reactor for producing tungsten has been described and simulated using two methods. Reliability of the calculations was verified by comparing the results obtained by the different methods. Also, the created model was applied for numerically solving the classical test problems and the study findings showed a good agreement with the exact solutions. The influence of a rotation effect upon the hydrodynamics and heat and mass transport was showed.

Развитие промышленности требует высокого качества используемых материалов. Большой интерес в различных областях индустрии представляют устойчивые к деформации, коррозии, высоким температурам тугоплавкие металлы. Одним из наиболее востребованных тугоплавких металлов является вольфрам. Оптимальным и перспективным методом его получения является химическое осаждение из парогазовой фазы путём восстановления гексафторида вольфрама водородом.

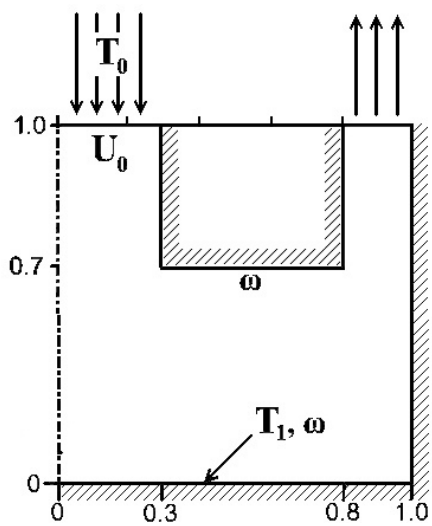


Рис. 1. Схематическое изображение вихревой камеры химического реактора

В работе представлено численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса жидкости в вихревой камере химического реактора с целью отслеживания влияния вращения потока для получения равномерного слоя вещества на подложке.

Реактор имеет цилиндрическую форму, впуск газов осуществляется через трубу на оси, а выпуск – через кольцевой канал на периферии камеры. Верхняя и нижняя стенки могут вращаться. Нижняя стенка нагревается, остальные – теплоизолированы (рис. 1).

Описанные процессы могут быть математически формализованы с помощью модели, включающей уравнения Навье–Стокса в проекциях на координатные оси (1)–(3), уравнения неразрывности (4), переноса тепла и массы (5) и (6) в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t}+\frac{\partial (u_r)^2}{\partial r}+\frac{\partial (u_z u_r)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}-\frac{u_r}{r^2}\right)+\frac{{u_\varphi}^2}{r}-\frac{{u_r}^2}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t}+\frac{\partial (u_r u_z)}{\partial r}+\frac{\partial (u_z)^2}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial r}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right)-\frac{u_r u_z}{r}+\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2}\vartheta; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial t}+\frac{\partial (u_r u_\varphi)}{\partial r}+\frac{\partial (u_z u_\varphi)}{\partial z}=-\frac{2u_r u_\varphi}{r}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial r}+\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2}-\frac{u_\varphi}{r^2}\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{\partial u_z}{\partial z}+\frac{u_r}{r}=0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t}+\frac{\partial (u_r \vartheta)}{\partial r}+\frac{(\partial u_z \vartheta)}{\partial z}=\frac{1}{\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial \vartheta}{\partial r}+\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}\right)-\frac{u_r \vartheta}{r}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial (u_r C)}{\partial r}+\frac{(\partial u_z C)}{\partial z}=\frac{1}{\mathrm{Pr}_D\cdot\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r}+\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)-\frac{u_r C}{r}. \quad (6)$$

Численное решение проводилось с использованием неявной обобщённой схемы переменных направлений в Δ-форме [1] и применением экспоненциальной схемы [2] для аппроксимации конвективных и диффузионных членов в уравнениях. Расчёты проводились двумя методами, указанными далее.

Достоверность расчётов подтверждена сопоставлением различных способов решения, а также сравнением с известными аналитическими решениями. На рис. 2 показано сопоставление графиков характеристик течения в различных сечениях, указанных на рисунке справа, полученных с помощью решений различными методами. Сплошными линиями обозначены результаты решения в физических переменных («скорость – давление»), точками – в переменных «вихрь – функция тока». Совпадение результатов методов демонстрирует правильность решения.

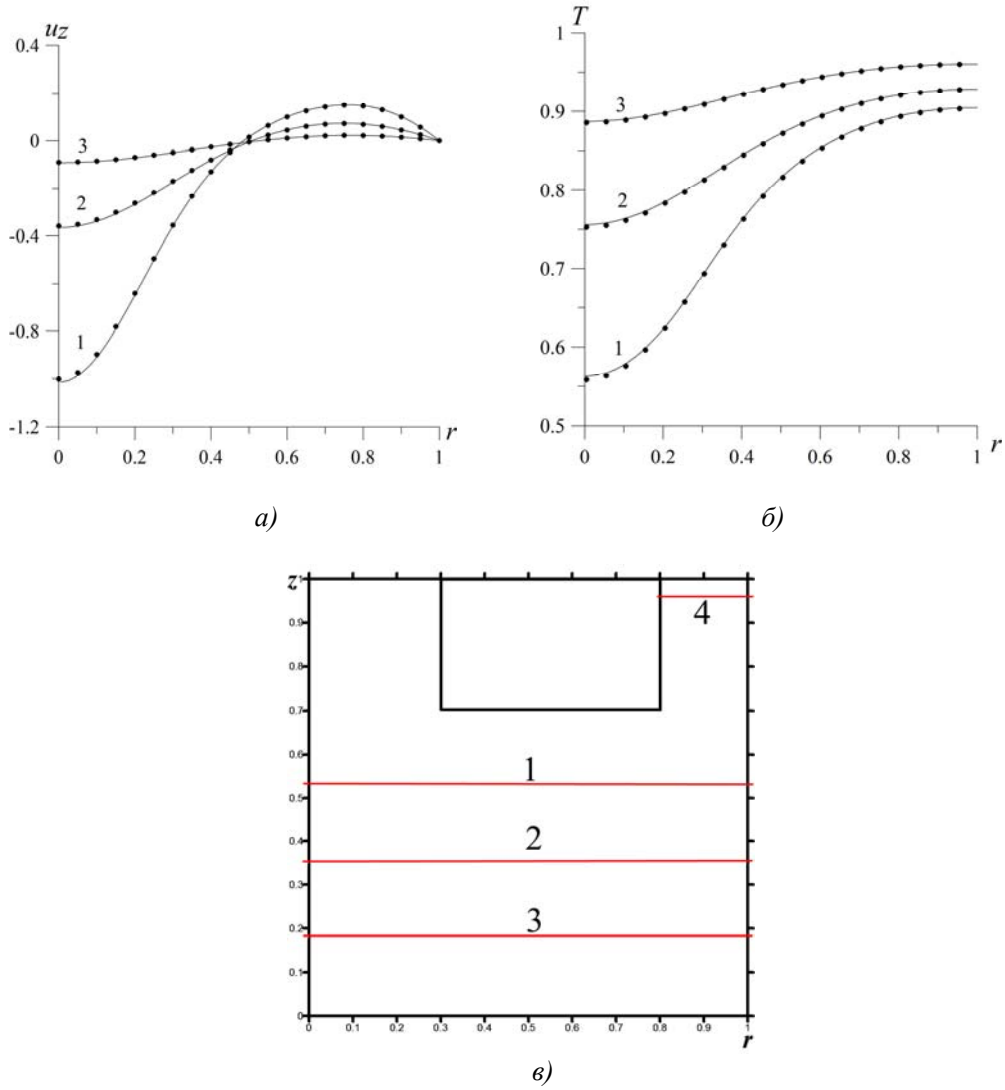
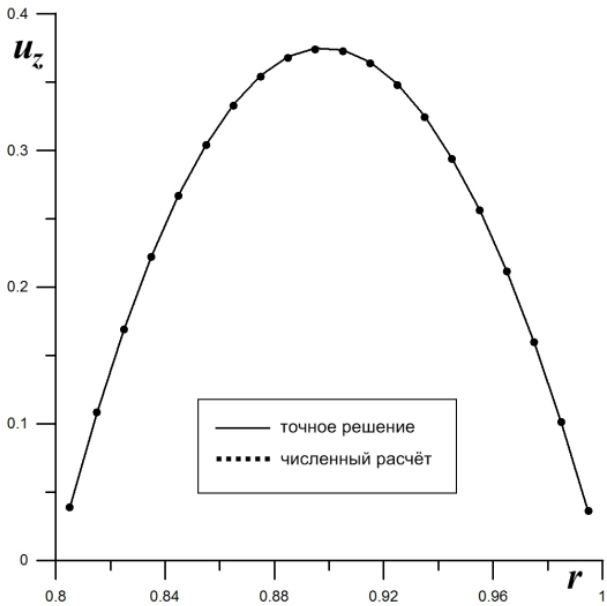
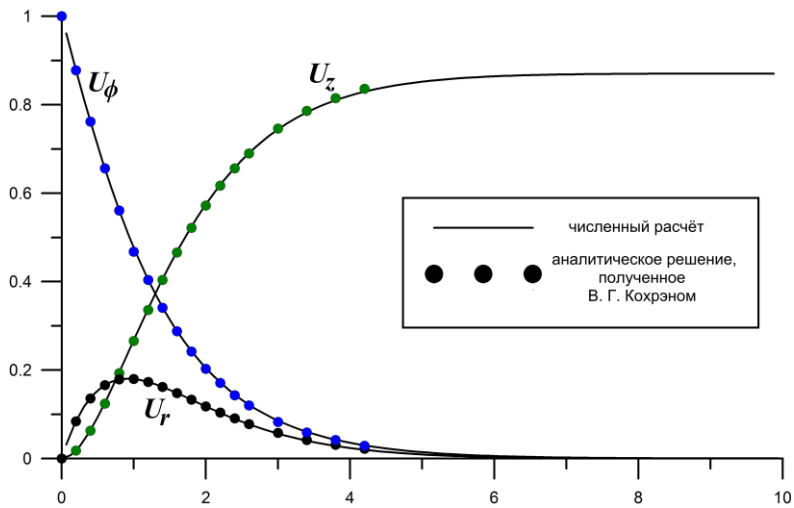


Рис. 2. Сопоставление решений, полученных различными методами, в сечениях в вихревой камере:
а – аксиальная составляющая скорости; *б* – распределение температуры; *в* – сечения в расчётной области

Рисунок 3, *а* иллюстрирует сравнение расчётного распределения скорости в кольцевом канале на выходе из реактора с аналитическим решением для данного установившегося течения [3] (распределение дано в сечении 4 на рис. 2, *в*). На рис. 3, *б* показаны результаты расчёта классической задачи о вращении диска в неподвижной жидкости с помощью разработанной модели [4]. Рисунок 3 демонстрирует хорошее совпадение расчётов с точными решениями.



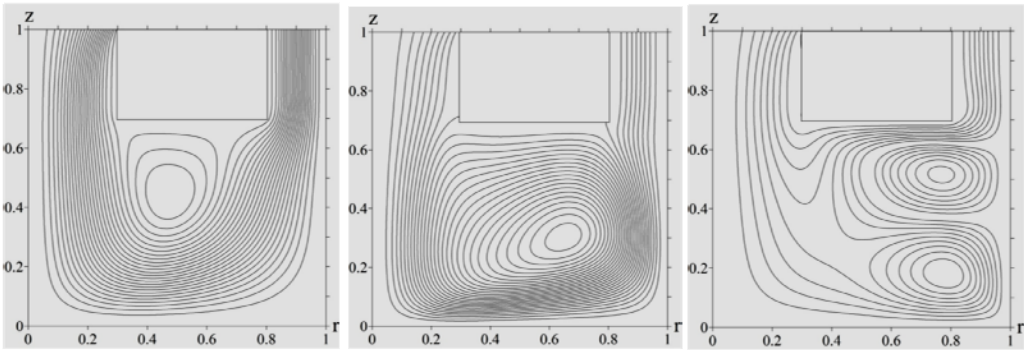
а)



б)

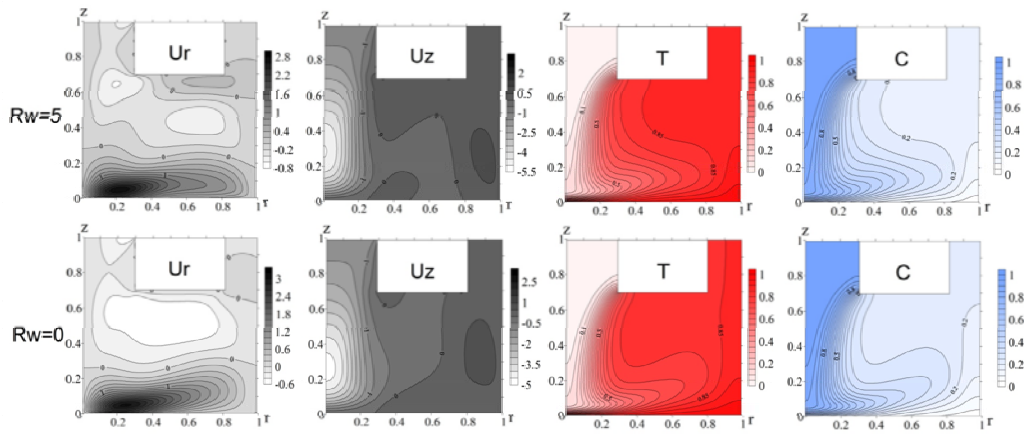
Рис. 3. Сравнение результатов модели с точными решениями: *а* – для установившегося решения в кольцевом канале; *б* – для течения вблизи вращающегося диска

Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5. На рис. 4 показано распределение линий тока в зависимости от различной степени закрутки при параметрах потока Re = 50, Pr = 1, Gr = 10^5.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Линии тока в реакторе при различных значениях критерия Россби:
а – Rω = 0; *б* – Rω = 1; *в* – Rω = 5



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 5. Влияние закрутки течения на его характеристики: *а* – радиальная составляющая скорости; *б* – аксиальная составляющая скорости; *в* – температура; *г* – концентрация

На рис. 5 показаны распределения основных характеристик потока в вихревой камере при закрутке потока (верхний ряд рисунков) и без неё (нижний ряд). Параметры потока: Re = 50, Pr = 1, Gr = 10^5, константа скорости реакции k = 50. Закрутка потока заметно влияет на поля скоростей, температуры и концентрации. Из визуализации результатов разработанной модели можно сделать вывод, что вращение стенок приводит к большей равномерности распределения массы и является целесообразным для получения равномерных покрытий на подложках.

Таким образом, с помощью созданной модели течения вязкой жидкости в вихревой камере химического реактора получены распределения полей скорости, температуры, концентрации при различных параметрах течения. Результаты свидетельствуют о существенном влиянии закрутки на гидродинамику потока; показано выравнивание полей распределения температуры и концентрации при закручивании пото-

ка, что имеет большое практическое значение для получения равномерных покрытий на подложке.

Литература

1. *Роуч П.* Вычислительная гидромеханика. М.: Мир, 1977. 618 с.

2. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. / под ред. Виленского. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

3. *Петухов Б.С.* Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 409 с.

4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя.: пер. с нем. гл. ред. физико-математической литературы изд-ва «Наука». М.: Наука, 1974. 712 с.