

*к.ф.- м.н. Мочалин Е.В.,
Мочалина И.Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА С ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Досліджено вплив особливостей модельного представлення поверхні обертового проникного циліндра на розподіл гідродинамічних характеристик у примежовому шарі на цій поверхні. Показано, що у випадку відсмоктування рідини крізь поверхню циліндра, збурення, зумовлені цими особливостями, не поширюються в зовнішній потік.

Ключові слова: *проникний циліндр, примежовий шар, профіль швидкості, турбулентна в'язкість.*

Исследовано влияние особенностей модельного представления поверхности вращающегося пронизываемого цилиндра на распределение гидродинамических характеристик в пограничном слое на этой поверхности. Показано, что в случае отсоса жидкости через поверхность цилиндра, возмущения, обусловленные этими особенностями, не распространяются во внешний поток.

Ключевые слова: *пронизываемый цилиндр, пограничный слой, профиль скорости, турбулентная вязкость.*

Анализ проблемы и постановка задач исследования. При исследовании гидродинамики некоторых технических устройств возникает задача исследования течения вблизи вращающегося пронизываемого цилиндра с отсасыванием жидкости через его поверхность. Примером таких устройств являются фильтры с вращающимся фильтроэлементом или ротационные фильтры для очистки жидких сред [1].

Применительно к ротационным фильтрам вращающийся цилиндр может представлять собой либо фильтровальную сетку, натянутую на цилиндрический каркас с относительно крупными (по сравнению с размерами ячеек сетки) отверстиями, либо цельный перфорированный цилиндр с большим количеством маленьких отверстий. В обоих случаях поверхность фильтроэлемента имеет чередующиеся пронизываемые и непронизываемые участки, что принято характеризовать коэффициентом живого сечения. Соответственно, распределение радиальной скорости вдоль образующей вращающегося фильтроэлемента не является равно-

мерным. Тем не менее, в расчетах во многих отношениях удобно пользоваться средней скоростью отсоса V_o , которая определяется отношением секундного объемного расхода жидкости к полной площади поверхности цилиндра. Такой подход представляется весьма удобным для формулировки граничных условий при численном анализе и в значительной степени определяет возможность расчета течения в масштабах всей области снаружи проницаемого цилиндра. Однако при этом возникает вопрос о величине погрешности, вносимой представлением об однородной проницаемости его поверхности.

В случае сетчатого цилиндра его рабочая поверхность вообще не является гладкой. Выполненные исследования [2,3] показали, что отрывной характер обтекания проволок сетки существенным образом влияет на картину течения в непосредственной близости от поверхности сетки и в ее ячейках. Однако неисследованным остается вопрос о том, в какой мере мелкомасштабные детали поверхности влияют на поток в остальной области снаружи вращающегося проницаемого цилиндра.

Таким образом, целью настоящего исследования является анализ влияния особенностей модельного представления проницаемой поверхности вращающегося цилиндра на течение жидкости с его внешней стороны.

Основные результаты. В основу анализа положено расчетное моделирование на основе численного решения, полученного на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых с применением модели турбулентности Ментера [4]. Характеристика используемого численного решения и его обоснование для условий рассматриваемого типа течений содержится в работах [5,6].

В процессе исследований сопоставлялись расчетные профили окружной скорости и турбулентной вязкости в кольцевой области между вращающимся внутренним и неподвижным наружным проницаемыми цилиндрами, полученными с применением трех различных расчетных схем. Первая схема (рис. 1) соответствует задаче о течении жидкости в кольцевой области снаружи однородно-проницаемого гладкого цилиндра. Этот вариант будем в дальнейшем называть модельным, учитывая упрощенное представление проницаемого цилиндра.

Две других расчетных схемы (рисунок 2) соответствуют плоским задачам о течении в областях, содержащих периодические фрагменты дискретно-перфорированного и сетчатого цилиндров.

Используемые в расчетах значения геометрических размеров по схемам на рисунках 1,2 равны

$$R_1 = 0.05 \text{ м}, R_2 = 1.1R_1, R_3 = 0.97R_1, R_4 = 0.87R_1, R_5 = 0.83R_1, l = 2.2R_1, \\ d = 0.008R_1, c = 0.005R_1.$$

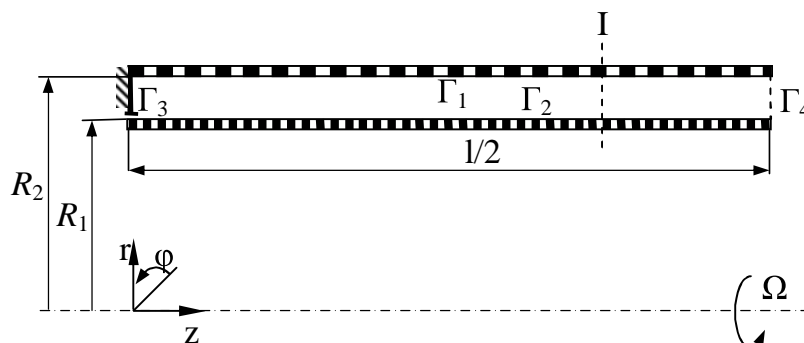


Рисунок 1 – Расчетная схема течения жидкости в кольцевой области между неподвижной внешней и вращающейся внутренней проницаемыми поверхностями

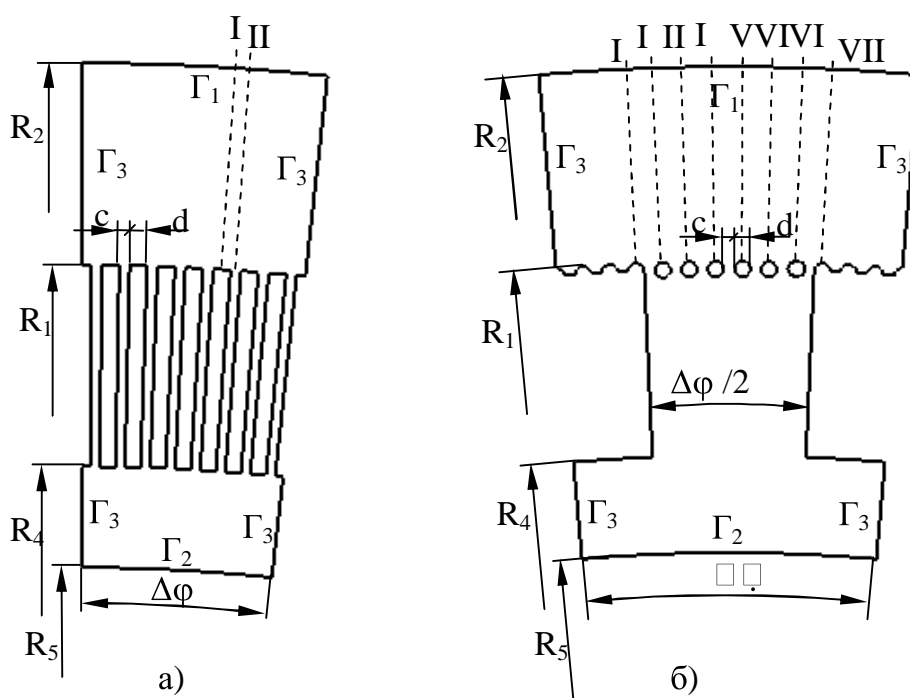


Рисунок 2 – Расчетные схемы течения жидкости в областях, содержащих периодические фрагменты плоских сечений равномерно перфорированного (а) и сетчатого (б) вращающихся цилиндров

По схеме на рисунке 1 в осесимметричной постановке рассматривается течение жидкости в кольцевой области между неподвижной проницаемой цилиндрической поверхностью (граница Γ_1) и вращающейся

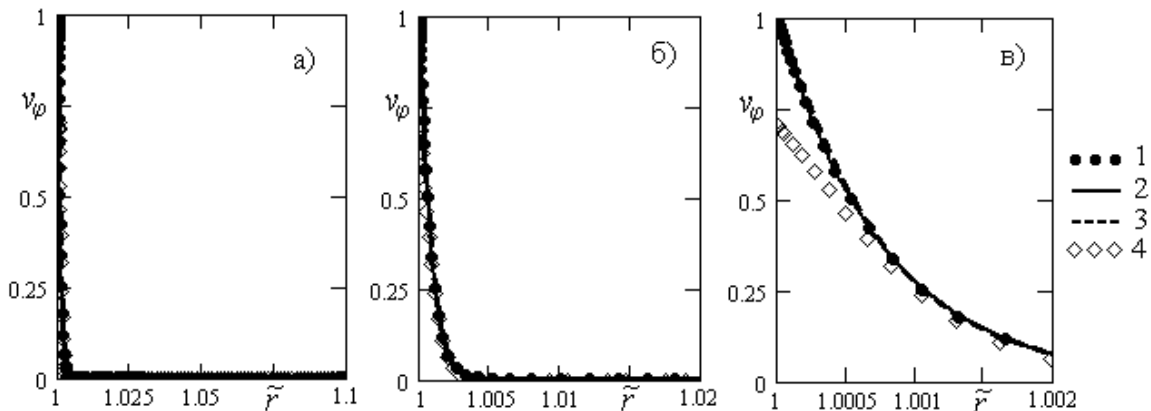
проницаемой поверхностью (граница Γ_2). Граница Γ_3 представляет собой неподвижную стенку. На границе Γ_4 определено условие симметрии течения. По обеим схемам на рис. 2 на границе Γ_1 , представляющей неподвижную проницаемую стенку, задается нормальная компонента скорости, определяющая расход жидкости. На границе Γ_2 задается статическое давление. На границах Γ_3 устанавливаются условия периодичности по окружной координате φ . Остальные границы представляют собой твердые непроницаемые поверхности, вращающиеся с угловой скоростью Ω .

Сравнительный анализ будем проводить для ряда сочетаний угловой скорости вращения и интенсивности отсоса, характеризуемых значениями вращательного числа Рейнольдса $Re_\varphi = \frac{\Omega R_1^2}{\nu}$ и безразмерной средней скорости отсоса $v_o = \frac{V_o}{\Omega R_1}$. Принципиальным условием возмож-

ности сравнения результатов расчета является отсутствие макровихрей в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра. В условиях макровихревого движения плоская постановка в соответствии с расчетными схемами на рисунке 2 не является справедливой.

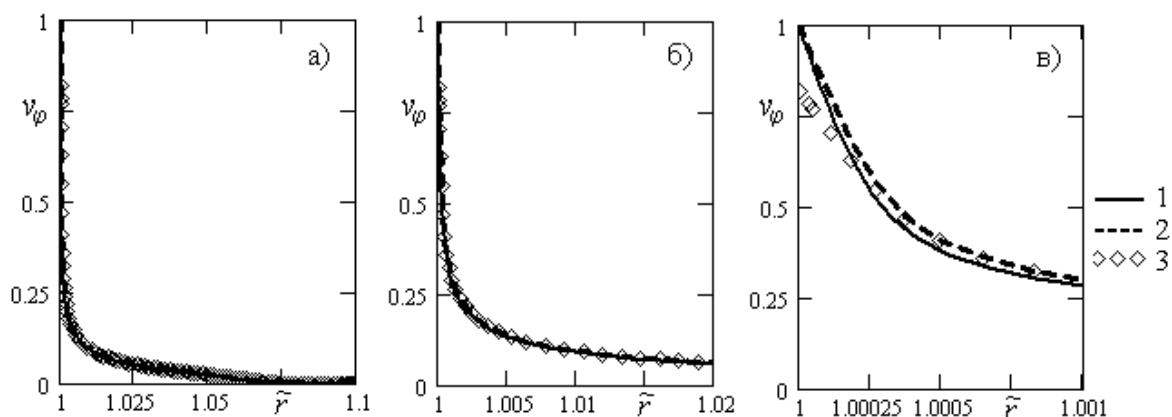
На рисунках 3 – 5 приведены в разном масштабе по оси \tilde{r} (безразмерная радиальная координата $\tilde{r} = r/R_1$) профили безразмерной окружной скорости ($v_\varphi = V_\varphi/(\Omega R_1)$) и относительной турбулентной вязкости ($\tilde{\nu}_t = \nu_t/\nu$). По схеме на рисунке 1 профили получены в характерном сечении I. В остальных сечениях, за исключением окрестностей торца (граница Γ_3), где всегда имеют место торцевые вихри, распределения гидродинамических характеристик идентичны. По схеме на рисунке 2а рассматриваются 2 характерных сечения: сечение I над непроницаемым участком поверхности и сечение II над отверстием в цилиндре.

Один из профилей на рисунке 3 соответствует аналитическому ламинарному профилю скорости, который в точности воспроизводится при численном решении в модельной осесимметричной постановке при имеющих место для этого варианта сочетаниях определяющих параметров Re_φ, v_o .



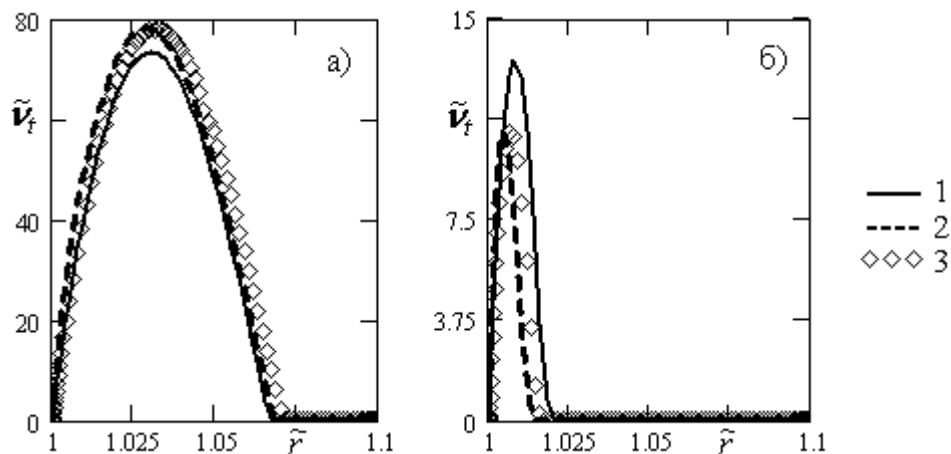
- 1 – ламинарная модель, аналитическое решение;
 2 – Модель Ментера, осесимметричная постановка;
 3 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение I;
 4 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение II.

Рисунок 3 – Профили окружной скорости по всему сечению снаружи вращающегося фильтроэлемента (а), в области $\tilde{r} \in [1, 1.02]$ (б) и в области $\tilde{r} \in [1, 1.002]$ (в) при $Re_\varphi = 5 \cdot 10^4$, $\nu_o = 0.0263$



- 1 – Модель Ментера, осесимметричная постановка;
 2 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение I;
 3 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение II.

Рисунок 4 – Профили окружной скорости по всему сечению снаружи вращающегося перфорированного цилиндра (а), в области $\tilde{r} \in [1, 1.02]$ (б) и в области $\tilde{r} \in [1, 1.002]$ (в) при $Re_\varphi = 5 \cdot 10^5$, $\nu_o = 0.005$

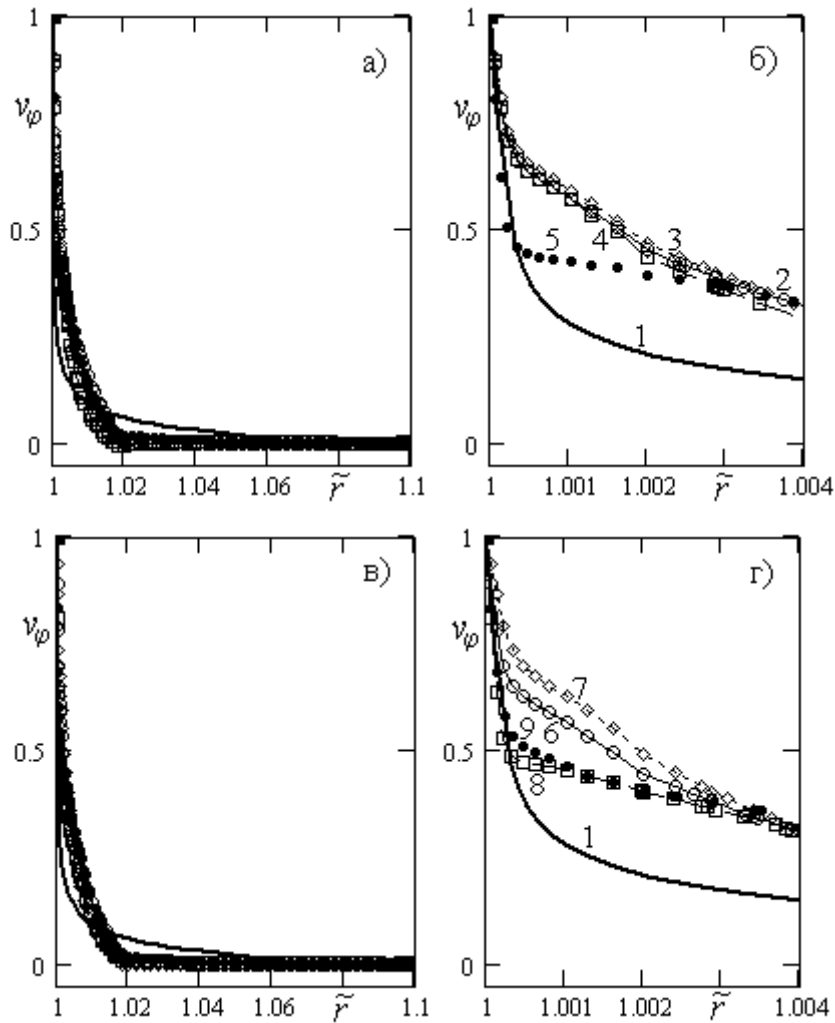


- 1 – Модель Ментера, осесимметричная постановка;
 2 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение I;
 3 – Модель Ментера, плоская постановка, сечение II.

Рисунок 5 – Профили турбулентной вязкости при $Re_\phi = 5 \cdot 10^5$, $v_o = 0.005$
 (а) и $Re_\phi = 3 \cdot 10^5$, $v_o = 0.0067$ (б)

Из сопоставления результатов следует, что профили скорости над непроницаемыми участками поверхности перфорированного цилиндра и для модельного осесимметричного случая практически совпадают для всех рассматриваемых исходных данных. А профили скорости над отверстиями в цилиндре отличаются от них только в пределах половины толщины ламинарного подслоя ($y^+ < 5$). Профили турбулентной вязкости весьма близки друг к другу во всех рассматриваемых случаях.

Для цилиндра с сетчатой поверхностью с модельным осесимметричным случаем сопоставлялись профили скорости (рисунок б) в ряде сечений, расположенных над различными проволочками сетки в районе отверстия в каркасе (рисунок 2б). Здесь отличия имеют место во всех сечениях, и объясняются они особенностями мелкомасштабного отрывного течения, которые рассмотрены в работах [2,3]. Однако важным является тот факт, что все эти отличия локализованы внутри пограничного слоя на поверхности модельного эквивалентного цилиндра и не распространяются за его пределы.



1 – осесимметричная модель; 2 – сечение I; 3 – сечение III; 4 – сечение V; 5 – сечение VII; 6 – сечение II; 7 – сечение IV; 8 – сечение VI; 9 – сечение VIII.

Рисунок 6 – Профили окружной скорости по всему сечению (а,в) и вблизи поверхности вращающегося сетчатого цилиндра (б,г) при $Re_\varphi = 5 \cdot 10^5$, $\nu_o = 0.005$

Выводы. Таким образом, выполненными исследованиями показано, что использование модельного представления вращающегося дискретно-проницаемого цилиндра в виде равномерно проницаемого гладкого цилиндра не влияет на течение за пределами пограничного слоя и не вносит заметных искажений в профили скорости и турбулентной вязкости в пределах пограничного слоя. Для вращающегося цилиндра, обтянутого сеткой, отличия в профилях скорости по сравнению с модельным гладким однородно-проницаемым цилиндром локализованы в пределах пограничного слоя на его поверхности и не передаются во

внешний поток за его пределами. Полученные результаты обосновывают возможность и устанавливают границы использования рассмотренного модельного представления вращающегося цилиндра при исследовании течения с его внешней стороны.

Одним из возможных направлений дальнейших исследований в данном направлении является оценка влияния коэффициента живого сечения дискретно-перфорированного вращающегося цилиндра на профили скорости в сечениях над отверстиями в нем. Представляют интерес и исследования, аналогичные выполненным, для случая втока жидкости через поверхность вращающегося цилиндра.

Библиографический список

1. *Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин / З.Л. Финкельштейн. – М.: Недра, 1986. – 232 с.*
2. *Мочалин Е.В. Гидродинамические особенности протекания жидкости через вращающуюся сетку / Е.В. Мочалин // Промислова гідравліка і пневматика. – 2007. – №2(16). – С. 53 – 60.*
3. *Мочалин Е.В. Гидродинамические особенности течения жидкости около вращающегося сетчатого цилиндра с отсосом через его поверхность / Е.В. Мочалин // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: 4 – я научная школа-конференция: тезисы докладов. – Алушта, 2006. – С. 48 – 50.*
4. *Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows / F.R. Menter // AIAA Paper. – 1993. – № 93-2906. – 21 p.*
5. *Мочалин Е.В. Численное моделирование течений вязкой жидкости в рабочей полости ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – Вып. 23. – С. 169 – 183.*
6. *Мочалин Е.В. Выбор модели турбулентности для анализа течения снаружи вращающегося пронизываемого цилиндра / Е.В. Мочалин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 2/6 (26). – С. 20 – 26.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г.В.