

УДК 536.252:532.527.2

Юрьев С.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)**ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ  
ВРАЩАЮЩИЙСЯ ПОРИСТЫЙ ЦИЛИНДР**

*Рассмотрены картины течения жидкости через вращающийся пористый цилиндр при различных значениях его сопротивления. Показаны зависимости неравномерности протекания жидкости через вращающийся пористый цилиндр от радиального числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления пористой перегородки. На основе приведенных зависимостей предложены оптимальные значения сопротивления пористой перегородки, обеспечивающие равномерный проток жидкости сквозь поверхность вращающегося пористого цилиндра.*

**Ключевые слова:** вращающийся пористый цилиндр, численное моделирование, гидродинамическое сопротивление.

**Введение.** Развитие макровихревых структур снаружи вращающегося пористого цилиндра сопровождается неравномерностью протекания жидкости через его поверхность. Во многих практических приложениях это явление нежелательно, поскольку приводит к очень сильному повышению локальных скоростей движения жидкости через перегородку.

Значительное влияние на характер течения и равномерность протекания жидкости оказывает сопротивление пористой перегородки. В частности, увеличение гидравлического сопротивления оказывает стабилизирующее влияние на течение в отношении образования макровихрей [1]. В то же время, повышение сопротивления перегородки приводит и к росту затрат энергии, так как увеличивает перепад давлений, необходимый для поддержания вынужденного течения жидкости.

**Поэтому целью данной работы** являются исследования, направленные на выяснение закономерностей и зависимостей, позволяющих определять минимальное значение коэффициента сопротивления вращающейся пористой перегородки, обеспечивающее достаточно равномерное распределение скорости протока жидкости при заданных значениях окружных ( $Re_\varphi$ ) и радиальных ( $Re_r$ ) чисел Рейнольдса, что важно в практическом отношении.

**Постановка задачи.** Характер течения в области между вращающимися цилиндрами наглядно отражают линии тока относительного движения жидкости (по отношению к вращающейся вместе с внутренним цилиндром системе координат) и относительные траектории частиц жидкости, пересекающих входное сечение.

В работе [1] показано, что возникающие в результате центробежной неустойчивости вихревые структуры (макровихри) могут блокировать значительную часть поверхности пористого цилиндра для протока жидкости, вплоть до того, что весь подаваемый через входное сечение поток протекает через малую часть этой поверхности у самого входного сечения.

С этой целью рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 1, для изучения характера протока жидкости через пористую поверхность. Данная схема соответствует осесимметричной постановке.

На входе в расчетную область (цилиндрическая поверхность  $r = R_2$ ) в качестве граничного условия принимаем:

$$V_{r0} = const, \quad (1)$$

где  $V_{r0}$  – скорость течения жидкости в радиальном направлении.

В выходном сечении условие ( $z = 0, R_3 \leq r \leq R_1 - \delta_f$ ) постоянства давления жидкости

$$p = p_a = const. \quad (2)$$

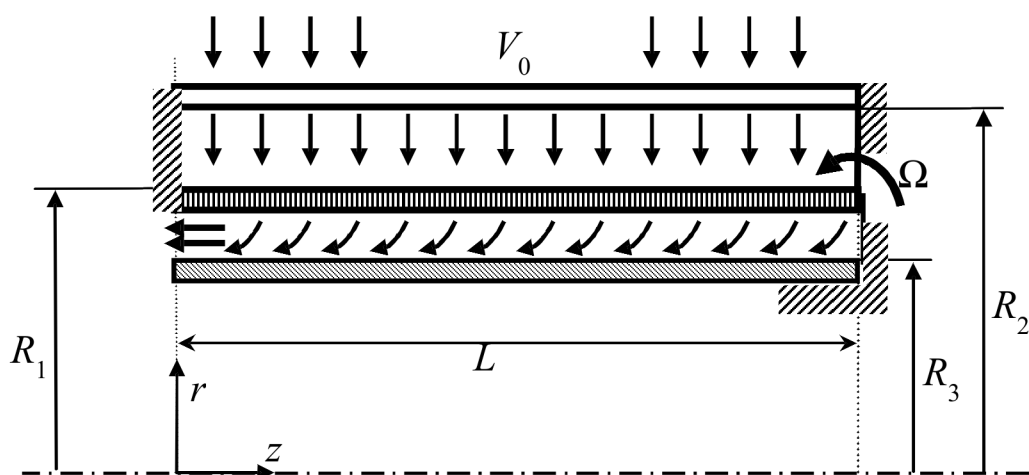


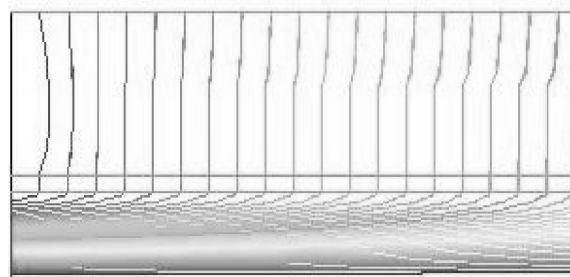
Рисунок 1 – Расчетная схема течения с радиальным подводом жидкости

В рассматриваемой постановке фильтрующий цилиндр входит в расчетную область и моделируется пористой перегородкой толщиной  $\delta_f$ . Такой подход позволяет не выставлять граничных условий, навязывающих распределение скорости протекания жидкости через цилиндр, а определять эту скорость в результате решения задачи. Для этого необходимо выбрать модель, в соответствии с которой будет рассматриваться течение жидкости в пределах проницаемой вращающейся цилиндрической перегородки. Такая модель, называемая моделью «пористой зоны», описана в работе [1].

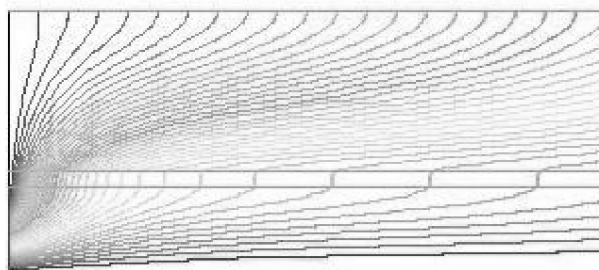
**Результаты.** В результате численного моделирования было установлено, что с уменьшением сопротивления пористой перегородки часть поверхности проницаемого цилиндра блокируется для протока жидкости. При этом площадь блокируемой поверхности растёт с увеличением  $Re_\phi$  и уменьшением  $Re_r$ . Такие результаты, представлены ниже на рисунках 2 - 8, которые получены при нескольких фиксированных значениях  $Re_\phi, Re_z$  и различном коэффициенте сопротивления пористой перегородки  $b_r$ .

При наибольшем из рассматриваемых значений  $b_r$  (рис. 6) возникает макровихревое движение, однако оно сосредоточено в кольцевой области над перегородкой и от-

теснено потоком от входного сечения. В этом случае имеет место близкое к равномерному распределение скорости протока жидкости через пористый цилиндр.

Рисунок 2 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 10^{11} \text{ м}^{-2}$ )

$$Re_\phi = 10^4, Re_r = 100$$

Рисунок 3 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 10^4 \text{ м}^{-2}$ )

$$Re_\phi = 10^4, Re_r = 100$$

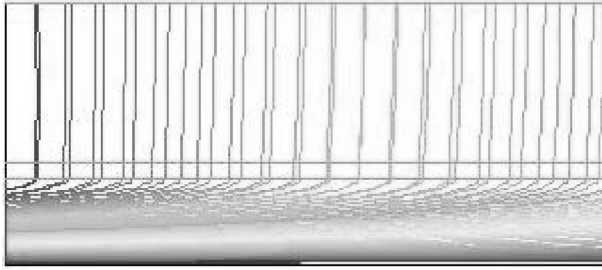


Рисунок 4 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$

$$\text{Re}_\phi = 10^4, \text{Re}_r = 5000)$$

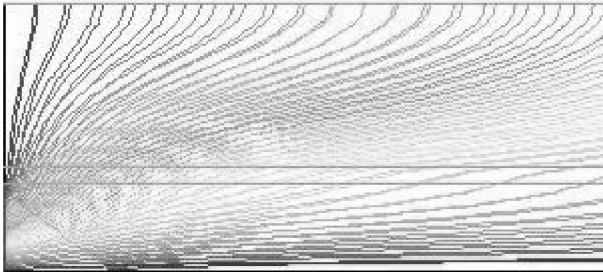


Рисунок 5 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$

$$\text{Re}_\phi = 10^4, \text{Re}_r = 5000)$$

При самом маленьком из рассматриваемых значений коэффициента сопротивления  $b_r$ , вторичные вихревые течения проникают сквозь пористую перегородку (рис. 7, 8), что сопровождается обратными перетоками через нее. При этом вся подаваемая жидкость протекает через пористый цилиндр в районе выходного сечения, а вдоль оставшейся поверхности несколько раз перетекает через перегородку в обоих направлениях. Это сопровождается крайне неравномерным распределением радиальной скорости вдоль поверхности цилиндра.

Выявим закономерности и зависимости, позволяющие определять минимальное значение коэффициента сопротивления вращающейся пористой перегородки, обеспечивающее достаточно равномерное распределение скорости протока жидкости при заданных значениях  $\text{Re}_\phi, \text{Re}_r$ .

Прежде всего, необходимо определить количественную меру равномерности протекания жидкости. В качестве такой характеристики примем отношение

$$k_{vr} = \frac{\max_{0.025L \leq z \leq 0.975L} |V_{r1}(z) - \overline{V_{r1}}|}{|\overline{V_{r1}}|}, \quad (3)$$

где  $\overline{V_{r1}}$  - среднее значение скорости протекания жидкости через перегородку.

Максимум в числителе определяется по осевой координате, за исключением участков вблизи торцов с суммарной длиной в 5% длины цилиндра. Параметр, определяемый формулой (3) назовём коэффициентом неравномерности протекания жидкости.

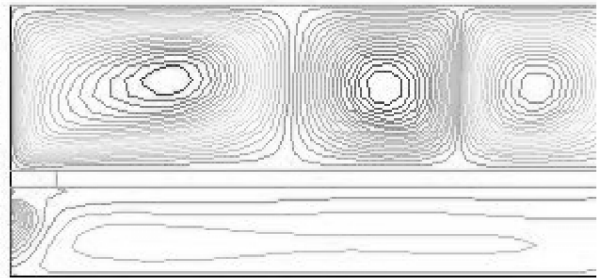


Рисунок 6 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$

$$\text{Re}_\phi = 2 \cdot 10^5, \text{Re}_r = 100)$$

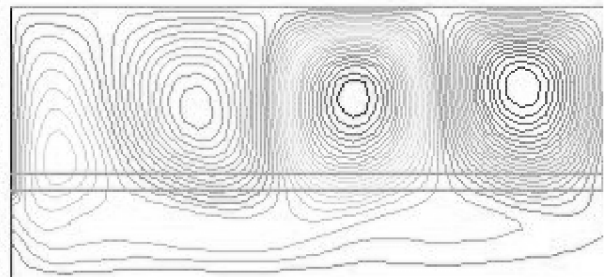


Рисунок 7 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$

$$\text{Re}_\phi = 2 \cdot 10^5, \text{Re}_r = 100)$$

Вместо размерного коэффициента сопротивления перегородки  $b_r$ , для большей общности рассмотрим безразмерный аналог, учитывающий толщину и радиус фильтрующего цилиндра:

$$\tilde{b}_r = b_r \delta_f R_1. \quad (4)$$

На рис. 9–11 представлены графики изменения коэффициента неравномерности  $k_{vr}$  в зависимости от радиального числа Рейнольдса, характеризующего интенсивность отсоса жидкости, при различных значениях вращательного числа Рейнольдса  $Re_\phi$ . На каждом рисунке приведены данные для различных значений коэффициента сопротивления перегородки  $\tilde{b}_r$ .

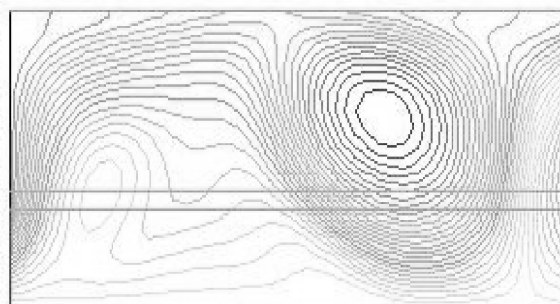
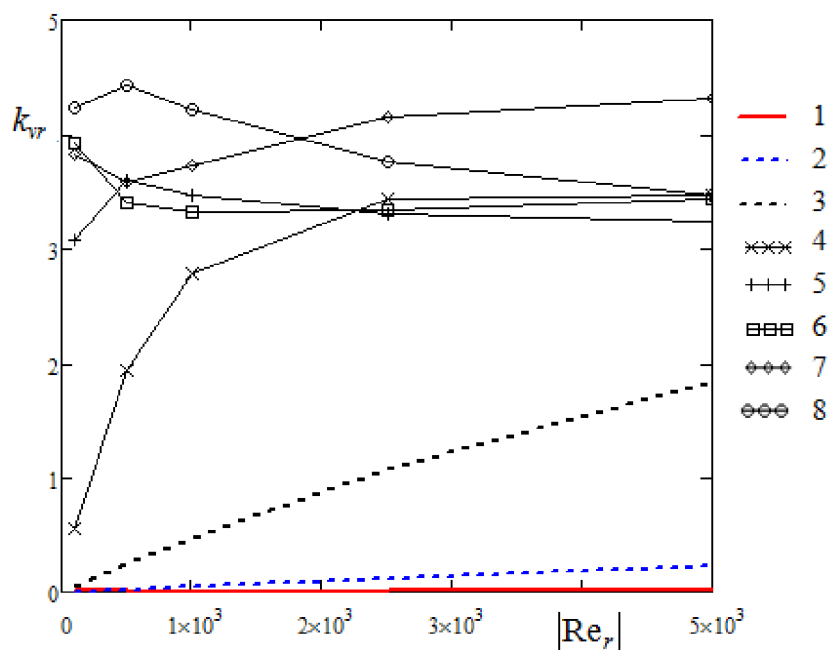


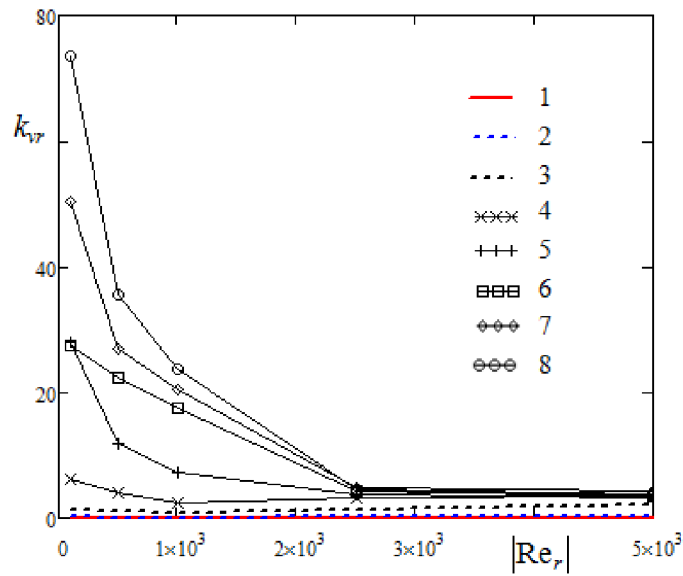
Рисунок 8 – Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ( $b_r = 1 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ )

$$Re_\phi = 2 \cdot 10^5, Re_r = 5000$$



$$1 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^7; 2 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^6; 3 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^5; 4 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^4; \\ 5 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^3; 6 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^2; 7 - \tilde{b}_r = 38.5; 8 - \tilde{b}_r = 3.85$$

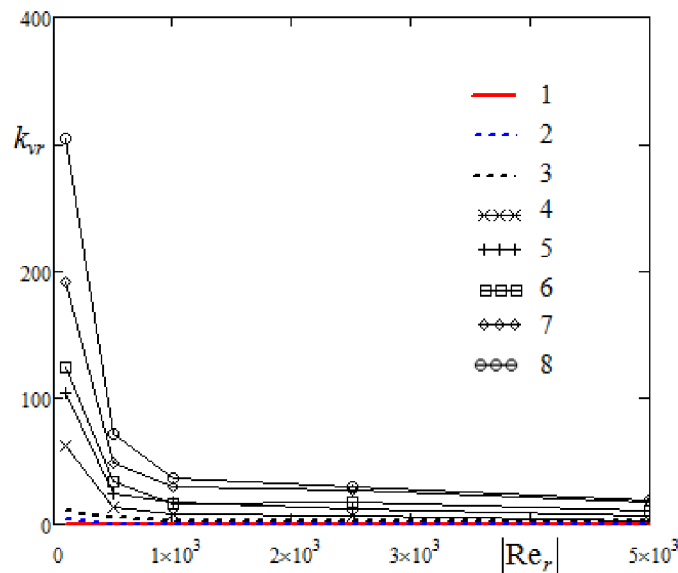
Рисунок 9 – Зависимость коэффициента неравномерности протекания жидкости через вращающийся пористый цилиндр от радиального числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления пористой перегородки ( $Re_\phi = 1 \cdot 10^4$ )



$$1 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^7; 2 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^6; 3 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^5; 4 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^4;$$

$$5 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^3; 6 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^2; 7 - \tilde{b}_r = 38.5; 8 - \tilde{b}_r = 3.85$$

Рисунок 10 – Зависимость коэффициента неравномерности протекания жидкости через вращающийся пористый цилиндр от радиального числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления пористой перегородки ( $Re_\varphi = 5 \cdot 10^4$ )



$$1 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^7; 2 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^6; 3 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^5; 4 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^4;$$

$$5 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^3; 6 - \tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^2; 7 - \tilde{b}_r = 38.5; 8 - \tilde{b}_r = 3.85$$

Рисунок 11 – Зависимость коэффициента неравномерности протекания жидкости через вращающийся пористый цилиндр от радиального числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления пористой перегородки ( $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$ )

**Вывод.** Сопоставление данных по величине коэффициента  $k_{vr}$  и характера течения (на основе картин линий тока) показывает, что неравномерность распределения скорости с уменьшением сопротивления перегородки сопровождается двумя основными проявлениями. Во-первых, это увеличение скорости  $V_{r1}$  вблизи того торца, у которого расположено выходное сечение. Во-вторых, это следствие наличия макровихрей, которыми обусловлено местное увеличение и уменьшение радиальной скорости вблизи перегородки.

Для обеспечения равномерного потока жидкости (газа) сквозь поверхность вращающегося цилиндра, из приведенных выше зависимостей, необходимо задать сопротивление пористой щели  $\tilde{b}_r$  в диапазоне  $3.5 \cdot 10^5$  ( $Re_r = 100$ ) -  $3.5 \cdot 10^6$  ( $Re_r = 5000$ ) для значений окружного числа Рейнольдса, характеризующего скорость вращения, от  $Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$  до  $Re_\varphi = 5 \cdot 10^4$ , и от  $3.5 \cdot 10^6$  до  $3.5 \cdot 10^8$  ( $Re_\varphi = 1 \cdot 10^5$  -  $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$ ). При данных значениях сопротивления пористой щели  $\tilde{b}_r$  значение коэффициента неравномерности остаётся  $k_{vr} < 1$ , что в большинстве случаев является приемлемым.

#### Библиографический список

1. Мочалин Е. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Е. В. Мочалин, А. А. Халатов. — Киев : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. — Т. 8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах. — 428 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. гидрогазовых систем НАУ Мочалиным Е.В., к.т.н., доц. ДонГТУ Чебаном В.Г.*

Статья поступила в редакцию 18.11.15.

**Юр'єв С.О.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧЕЇ РІДИНИ КРІЗЬ ОБЕРТОВИЙ ПОРИСТИЙ ЦИЛІНДР

*Розглянуто картини течії рідини крізь обертовий пористий циліндр за різними значеннями його опору. Показані залежності нерівномірності протікання рідини через обертовий пористий циліндр від радіального числа Рейнольдса і коефіцієнта опору пористої перегородки. На основі наведених залежностей запропоновано оптимальні значення опору пористої перегородки, що забезпечує рівномірне протікання рідини крізь поверхню обертового проникного циліндра.*

**Ключові слова:** обертовий проникний циліндр, чисельне моделювання, гідродинамічний опір.

**Yuriev S.A.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

#### CHARACTERISTICS OF FLUID FLOWING THROUGH ROTATING POROUS CYLINDER

*Patterns of fluid flow through rotating porous cylinder at various values of its resistance have been examined. Dependences of irregularity at fluid flowing through rotating porous cylinder from radial Reynold number and resistance coefficient of porous barrier are shown. On the basis of given dependences the optimal resistance values of porous barrier were proposed, which provided a uniform fluid flowing through surface of rotating penetrable cylinder.*

**Key words:** rotating penetrable cylinder, numerical modeling, hydrodynamic resistance.