

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ПРОНИЦАЕМЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

А.А. Александров

rector@bmstu.ru

В.А. Девисилов

devisilov@bmstu.ru

Е.Ю. Шарай

e9.sharay@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты компьютерного моделирования течения жидкости в кольцевом канале гидродинамического фильтра с защитной перфорированной перегородкой между цилиндрическими перфорированной защитной и фильтровальной перегородками. Изучено влияние площади отверстий перфораций защитной перегородки, ширины кольцевого канала между цилиндрическими защитной и фильтровальной перегородками на структуру потоков. Установлено, что увеличение ширины кольцевого канала и площади перфорации защитной перегородки приводит к образованию в канале вторичных вихревых структур. Получено распределение окружных скоростей в канале гидродинамического фильтра между защитной и фильтровальной перегородками. Показано, что в рассмотренном диапазоне режимных и конструктивных параметров профиль окружной скорости может быть аппроксимирован степенной зависимостью со значением степени 2,4–3,3. Установлено, что интенсивность детерминированных составляющих процесса разделения определяется конструктивными и режимными параметрами канала между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями. К конструктивным параметрам относятся ширина канала и площадь отверстий перфорации, а к режимным — угловая скорость вращения. Предложенная организация течения в гидродинамическом фильтре позволяет уменьшить интенсивность случайных составляющих процесса разделения в многофазных средах

Ключевые слова

Численное моделирование, вихревые структуры, гидродинамический фильтр, вращающийся цилиндр, кольцевой канал, проницаемый цилиндр, вращающийся фильтроэлемент, сепарация

Поступила 19.06.2019

Принята 02.07.2019

© Автор(ы), 2020

*Работа выполнена в рамках государственного заказа
Минобрнауки России (№ 10.7766.2017/8.9)*

Введение. Очистка воды от твердых механических включений — обязательная стадия любых технологий водоподготовки и остается одной из важных задач с позиции экологической безопасности и повышения надежности и безаварийности работы технических систем. Широко распространенным методом разделения твердой и жидкой фаз является фильтрование [1, 2]. Из группы сетчатых фильтров можно выделить гидродинамические фильтры [3–7]. В основе принципа работы данных аппаратов лежит двухступенчатая очистка, реализуемая в одном корпусе — обработка жидкости в поле центробежных сил и тангенциальное фильтрование через пористую перегородку. Сочетание двух факторов — закрутки потока и наличия фильтрующей перегородки — обеспечивает указанным фильтрам такие преимущества, как увеличение ресурса работы при сохранении эффективности и тонкости очистки по сравнению с традиционным фильтрованием; наличие самоочистки фильтровальной перегородки в отличие от фильтрующей центрифуги; снижение себестоимости тонкой очистки рабочих, смазывающих, охлаждающих и других жидкостей.

Среди многообразия конструктивного исполнения гидродинамических фильтров можно выделить фильтры с защитной перегородкой (рис. 1) [8, 9], принцип работы которых основан на тангенциальном фильтровании жидкости через вращающуюся фильтровальную перегородку 3. Очищаемая жидкость поступает в конический корпус 1 через тангенциальный патрубок 4. Рабочая зона фильтра разделена вращающейся защитной перегородкой 2 с перфорированными отверстиями на два канала — конфузорный I и кольцевой II, причем защитная 2 и фильтровальная 3 перегородки имеют одинаковую частоту вращения. Канал I образован коническим корпусом фильтра 1 и цилиндрической защитной перегородкой 2, канал II — цилиндрическими защитной 2 и фильтровальной 3 перегородками.

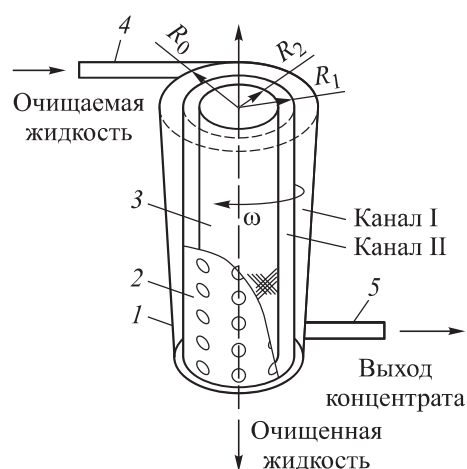


Рис. 1. Схема гидродинамического фильтра с защитной перегородкой: 1 — корпус фильтра; 2 — защитная перегородка; 3 — фильтровальная перегородка; 4 — тангенциальный патрубок входа; 5 — тангенциальный патрубок выхода

Первоначальная закрутка потока на выходе из тангенциального патрубка 4 под действием центробежной силы позволяет отбрасывать крупные частицы загрязнения с плотностью большей, чем плотность несущей фазы, к стенкам корпуса. Отброшенные частицы подхватываются перепускаемым потоком в количестве до 15 % от исходного расхода жидкости и выносятся из фильтра через тангенциальный патрубок выхода 5. Основной поток с оставшимися загрязнениями поступает на фильтровальную перегородку через защитную перфорированную перегородку, очищенная жидкость выводится через нижний слив.

Технический результат введения в корпус фильтра защитной вращающейся перфорированной перегородки 3 заключается в повышении эффективности центробежной сепарации за счет уменьшения влияния случайных составляющих процесса сепарации дисперсной фазы [10] в канале II. Это приводит к дополнительному увеличению ресурсных характеристик фильтровальной перегородки 3 и эффективности работы всего аппарата в целом. Гидродинамические процессы разделения имеют стохастическую природу. В их основе лежат как детерминированные, так и вероятностно-статистические явления. В канале I имеет место радиальное движение разделяемой дисперсной системы, которое может быть рассмотрено в рамках модели плоскопараллельного движения. При этом окружное движение разделяемой дисперсной системы может быть описано с помощью закона [11, 12]:

$$ur^n = u_0 R_0^n = C_1, \quad (1)$$

где u — окружная скорость движения дисперсной системы; r — текущий радиус ($R_1 \leq r \leq R_0$, R_1 , R_0 — радиусы защитной перегородки и корпуса фильтра соответственно, см. рис. 1); n — постоянный показатель, зависящий от свойств дисперсной системы ($n > 0$); u_0 — окружная скорость движения дисперсной системы при $r = R_0$, определяемая входной характеристикой потока тангенциального ввода; C_1 — константа.

Анализ выражения (1) показывает, что воздействие центробежной силы на частицы дисперсной фазы в канале I резко падает не только по мере увеличения текущего радиуса r и с изменением свойств дисперсной системы, но и со снижением входных характеристик (скорости потока на входе в рабочую зону фильтра) потока тангенциального ввода u_0 . В результате интенсивность случайных составляющих процесса разделения в канале I начинает играть определяющую роль, что снижает эффективность сепарации разделяемой системы, так как появляются случайные

возмущения движения частиц. В канале II центробежная сила F_c , действующая на частицу дисперсной фазы, определяет интенсивность детерминированных составляющих процесса разделения:

$$F_c = C_2 \omega^2 r. \quad (2)$$

Здесь C_2 — константа; ω — угловая скорость вращения фильтровальной и защитной перегородок; r — текущий радиус ($R_2 \leq r \leq R_1$, R_2 — радиус фильтровальной перегородки, см. рис. 1). Соотношение (2) показывает, что воздействие центробежной силы на частицы в канале II возрастает с увеличением радиуса r и угловой скорости ω и в явном виде не зависит от входных характеристик потока канала I. Поэтому влияние случайных составляющих процесса сепарации дисперсной фазы в канале II снижается, что обеспечивает дополнительное увеличение ресурсных характеристик фильтровальной перегородки. Однако поведение частиц дисперсной фазы в каналах I и II также будет определяться конструктивными параметрами фильтра: углом конусности и средней шириной канала I, размерами отверстий и типом перфораций защитной перегородки, шириной канала II. Кроме того, с увеличением числа Рейнольдса возможна потеря устойчивости течения с возникновением таких режимов течения, как вихри Тейлора и режима с бегущими волнами, с образованием различных неустойчивых режимов движения жидкости [13], приводящих к ухудшению сепарации частиц.

Влияние геометрических параметров канала I фильтра на процесс вихреобразования — угла конусности корпуса гидродинамического фильтра и ширины кольцевого зазора между неподвижным корпусом и вращающейся защитной перегородкой — изучено в работе [8]. Установлено, что увеличение ширины кольцевого канала I и угла конусности корпуса фильтра приводит к интенсификации циркуляционного течения с образованием вторичных вихревых структур. Для полного понимания процессов, происходящих в гидродинамическом фильтре и влияющих на эффективность сепарации частиц, необходимо иметь представление не только об определяющих параметрах в канале I, но и в канале II.

Цель работы — исследовать течение жидкости между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями в канале II гидродинамического фильтра с защитной перегородкой при различных режимах и конструктивных параметрах канала.

Метод исследования. В качестве метода исследования использовано численное моделирование [14]. Математическая модель построена на основе уравнений Навье — Стокса, дополнена моделью турбулентности

$k-\varepsilon$ [8] и граничными условиями. Расчетная область представлена проточной частью гидродинамического фильтра (рис. 2) и состоит из вращающихся проточных каналов 1 защитной перегородки; кольцевого канала 2 между защитной и фильтровальной перегородками; вращающегося объема фильтровальной перегородки 3, представленного как пористый материал с эквивалентным гидравлическим сопротивлением; цилиндрической проточной части канала сбора 4 очищенной жидкости. В целях экономии вычислительных ресурсов расчетная область представлена четвертью реальной модели с условием круговой периодичности, предполагающим, что течение периодически повторяется по плоскостям меридионального сечения.

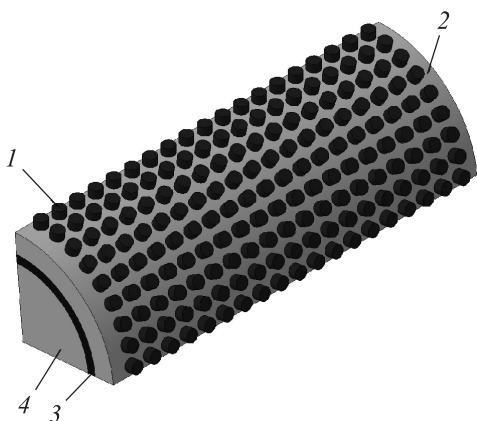


Рис. 2. Расчетная модель:

1 — вращающиеся проточные каналы защитной перегородки; 2 — проточная область канала между защитной и фильтровальной перегородками; 3 — вращающийся объем фильтровальной перегородки; 4 — проточная часть канала сбора очищенной жидкости

Численное исследование проведено для четырех моделей проточной части фильтра, отличающихся шириной S канала II и степенью перфорации защитной перегородки (таблица). Рассмотрены модели с двумя видами перфорации (рис. 3). Перфорация образована круглыми отверстиями диаметром d , идущими прямыми рядами с шагом вдоль образующей цилиндра p и угловым шагом по окружности φ . Остальные геометрические характеристики идентичны для всех расчетных моделей: длина рабочего канала 100 мм; толщина защитной перегородки 3 мм; диаметр канала сбора очищенной жидкости 36 мм.

Характеристики расчетных моделей*

Характеристика модели	Расчетная модель			
	1	2	3	4
Перфорация	$d = 5$ мм, $p = 10$ мм, $\varphi = 18^\circ$ (рис. 3, а)	$d = 3$ мм, $p = 5$ мм, $\varphi = 10^\circ$ (рис. 3, б)	$d = 5$ мм, $p = 10$ мм, $\varphi = 18^\circ$ (см. рис. 3, а)	$d = 3$ мм, $p = 5$ мм, $\varphi = 10^\circ$ (см. рис. 3, б)

Характеристика модели	Расчетная модель			
	1	2	3	4
Ширина S канала II, мм	5	5	10	10
Радиус R_1 защитной перегородки, мм	25	25	30	30

*Радиус фильтровальной перегородки для всех расчетных моделей $R_2 = 20$ мм.

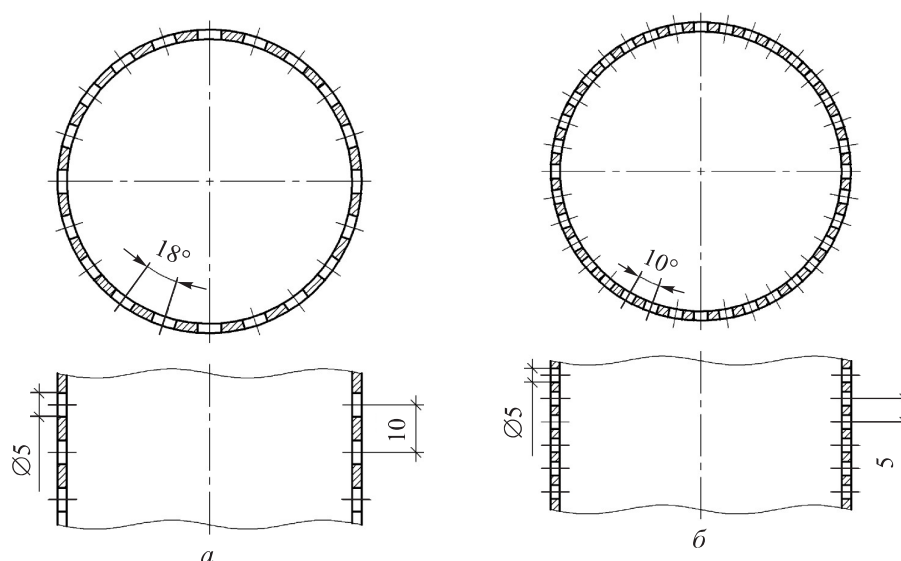


Рис. 3. Схемы расположения отверстий перфорации защитной перегородки, используемые при моделировании:

a — $d = 5$ мм, $p = 10$ мм, $\varphi = 18^\circ$; b — $d = 3$ мм, $p = 5$ мм, $\varphi = 10^\circ$

Рабочая жидкость, используемая при моделировании: вода при постоянной температуре $T = 25$ °С плотностью 997 кг/м³ и динамической вязкостью $8,9 \cdot 10^{-4}$ кг/(м · с). Суммарный массовый расход через перфорированные отверстия в защитной перегородке $0,17$ кг/с.

Результаты исследования и обсуждение. Получены зависимости окружной компоненты скорости u в канале II от текущего радиуса r для различных значений угловой скорости ω . Распределения скорости по радиусу построены для двух случаев: 1) в горизонтальных плоскостях, проходящих через центр отверстия перфорации защитной перегородки (кривые 1, 3, рис. 4 и 5); 2) посередине между двумя рядами горизонтальных отверстий (кривые 2, 4 см. рис. 4 и 5). Первый набор кривых при

максимальном значении r , т. е. при $r = R_1$, отражает значение окружной скорости в центре отверстия защитной перегородки, а последний — на стенке защитной перегородки.

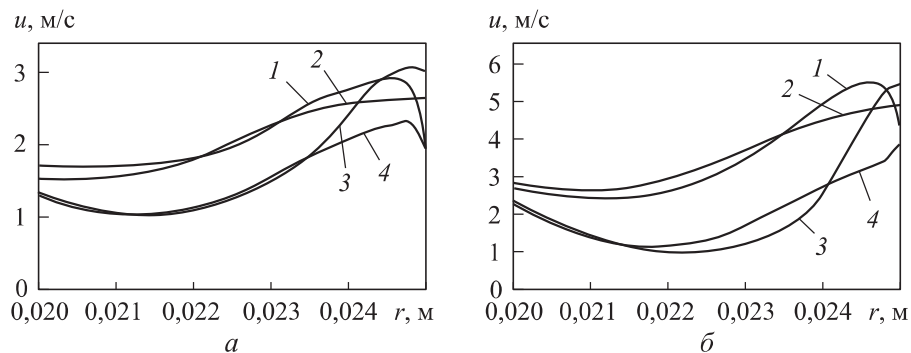


Рис. 4. Зависимость окружной компоненты скорости u в канале II от текущего радиуса r при значениях угловой скорости $\omega = 78,5$ (а), $157,0$ (б), $314,0$ рад/с (в) для расчетных моделей 1 (1, 2) и 2 (3, 4)

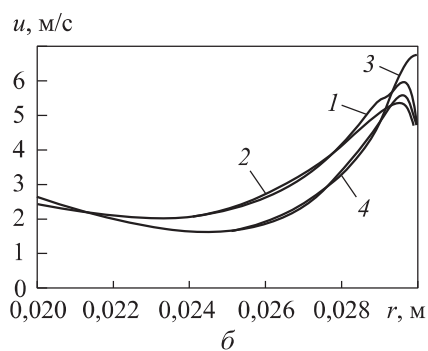
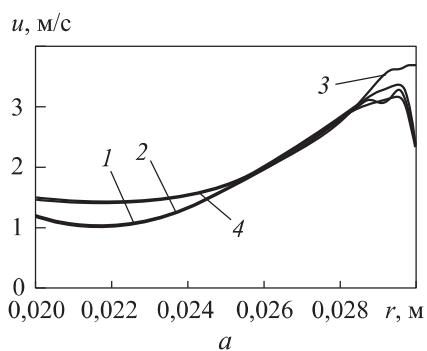
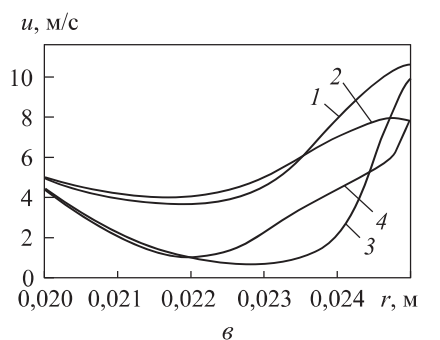
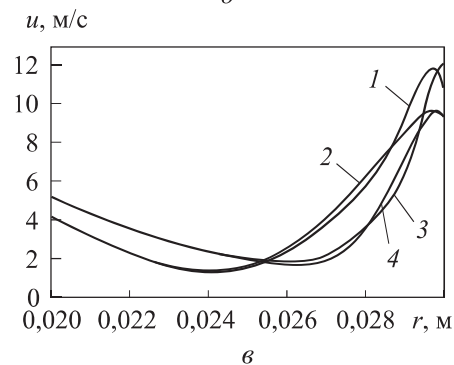


Рис. 5. Зависимость окружной компоненты скорости u в канале II от текущего радиуса r при значениях угловой скорости $\omega = 78,5$ (а), $157,0$ (б), $314,0$ рад/с (в) для расчетных моделей 3 (1, 2) и 4 (3, 4)



Результаты анализа графиков, приведенных на рис. 4, показали, что зависимость окружной скорости u от текущего радиуса защитного канала II может быть аппроксимирована степенной зависимостью вида

$$u(r) = Cr^n \text{ при } R^2 \geq 0,8, \quad (3)$$

где C , n — константы; R^2 — величина достоверности аппроксимации. Так, при угловой скорости вращения $\omega = 78,5$ рад/с данное условие выполняется для кривой 1 ($u(r) = 5,7 \cdot 10^5 r^{2,7}$ при $R^2 = 0,80$) и кривой 2 ($u(r) = 4,0 \cdot 10^5 r^{3,2}$ при $R^2 = 0,96$); при угловой скорости вращения $\omega = 157,0$ рад/с — для кривой 1 ($u(r) = 4,0 \cdot 10^7 r^{4,0}$ при $R^2 = 0,83$) и кривой 2 ($u(r) = 1,0 \cdot 10^6 r^{3,3}$ при $R^2 = 0,91$).

Согласно результатам анализа графиков, приведенных на рис. 5, степенной зависимостью аппроксимируются только кривые на рис. 5, а при угловой скорости вращения $\omega = 78,5$ рад/с: кривая 1 ($u(r) = 3,4 \cdot 10^5 r^{3,3}$ при $R^2 = 0,91$) и кривая 2 ($u(r) = 1,2 \cdot 10^4 r^{2,4}$ при $R^2 = 0,85$).

Таким образом, исследование четырех моделей показало, что наличие перфорации играет определяющую роль в формировании структуры потоков. Большая площадь отверстий вызывает отклонения от степенной зависимости окружной скорости в канале II, что показывают кривые 3, 4, см. рис. 4 и 5. Этот вывод подтверждается и при сравнении двух серий кривых — 1 и 2, 3 и 4. Меньшую величину достоверности аппроксимации R^2 степенной зависимостью имеют кривые распределения окружной скорости от радиуса r в горизонтальной плоскости, проходящей через центр отверстия перфорации защитной перегородки (кривые 1, 3, см. рис. 4 и 5). Течение жидкости у поверхности дискретно перфорированного фильтроэлемента рассмотрено в работе [15]. Сравнение результатов исследований показало хорошее согласование характера профиля окружной скорости вблизи отверстий перфорированной перегородки, что свидетельствует о правильности рассуждения.

Ширина S канала II и угловая скорость вращения ω перегородок являются параметрами комплексного действия, так как определяют степень неустойчивости потока и переход к вихревому течению с образованием вихрей Тейлора. При $\omega = 78,5$ рад/с для всех рассмотренных моделей при ширине канала $S = 5$ и 10 мм выполняется условие (3) и отсутствуют вихри Тейлора. Однако при $\omega = 157,0$ рад/с условие (3) выполняется только в моделях с шириной канала $S = 5$ мм, при $\omega = 314,0$ рад/с условие (3) нарушается для всех моделей, что соответствует картинам течений, показанным на рис. 6.

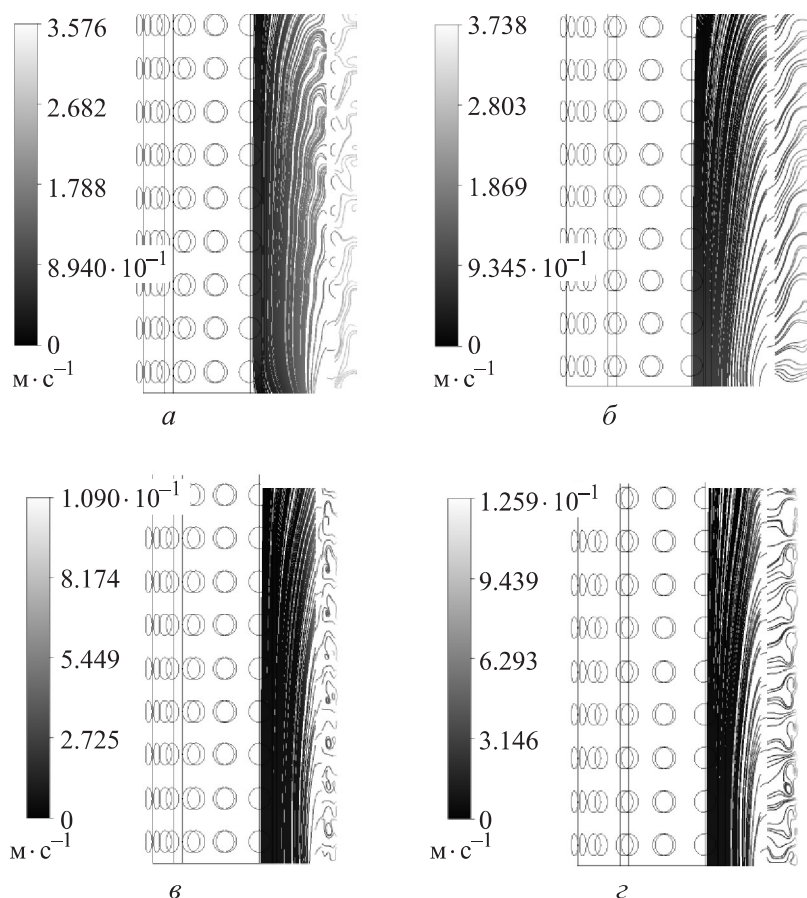


Рис. 6. Изолинии скорости в меридиональном сечении для расчетных моделей 1 (а, в) и 3 (б, г) при $\omega = 78,5$ (а, б) и $314,0$ рад/с (в, г)

Выводы и рекомендации. Течение в канале гидродинамического фильтра, образованного цилиндрическими защитной и фильтровальной перегородками, можно описать с помощью модели радиального распределения окружной скорости. Можно предположить, что радиальное распределение окружной скорости рассматриваемого течения имеет показатель степени n , отличный от 1, для классического случая течения между вращающимися цилиндрами вследствие наличия радиальной компоненты скорости, обуславливающей движение потока по направлению к фильтровальной перегородке. В рассмотренных моделях показатель степени n изменяется в диапазоне от 2,4 до 3,3. Интенсивность детерминированных составляющих процесса разделения определяется конструктивными (ширина канала и площадь отверстий перфорации) и режимными (угловая скорость вращения) параметрами канала между проницаемыми вращаю-

щимися цилиндрическими поверхностями. На структуру потоков в канале и, следовательно, на разделяющую способность будет оказывать влияние гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, что требует проведения дополнительного исследования.

Показана возможность использования гидродинамического фильтра для очистки маловязких жидкостей, интенсивность случайных составляющих процесса разделения для которых имеет определяющее значение. Введение дополнительной защитной перегородки позволяет увеличить интенсивность детерминированных составляющих процесса разделения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tarleton E.S. Progress in filtration and separation. Academic Press, 2014.
- [2] Мочалин Е.В., Халатов А.А. Проблемы промышленной очистки жидкостей от механических примесей и применение ротационных фильтров. *Промышленная теплотехника*, 2009, т. 31, № 2, с. 19–30.
- [3] Holdich R.G., Cumming I.W., Smith I.D. Crossflow microfiltration of oil in water dispersions using surface filtration with imposed fluid rotation. *J. Memb. Sci.*, 1998, vol. 143, iss. 1-2, pp. 263–274. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00023-4)
- [4] Akagi T., Horie T., Masuda H., et al. Improvement of separation performance by fluid motion in the membrane module with a helical baffle. *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 198, pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.012>
- [5] Jaffrin M.Y. Hydrodynamic techniques to enhance membrane filtration. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2012, vol. 44, pp. 77–96. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101112>
- [6] Ahmari H., Heris S.Z. Numerical analysis of mass and momentum transfer in co-axial cylinders with rotating inner cylinder. *Bulg. Chem. Commun.*, 2015, vol. 47, no. 2, pp. 491–496.
- [7] El Rayess Y., Manon Y., Jitariouk N., et al. Wine clarification with Rotating and Vibrating Filtration (RVF): investigation of the impact of membrane material, wine composition and operating conditions. *J. Memb. Sci.*, 2016, vol. 513, pp. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.058>
- [8] Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. и др. Влияние геометрических параметров рабочего канала гидродинамического фильтра с защитной перегородкой на структуру течения среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 2 (77), с. 23–38. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>
- [9] Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Гидродинамическое фильтрование. *Безопасность в техносфере*, 2015, т. 4, № 3, с. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.12737/11885>

- [10] Крохина А.В., Львов В.А., Павлихин Г.П. и др. Исследование асимптотических свойств модели гидродинамической стадии эволюции процесса классификации в аппаратах циклонного типа. *Безопасность в техносфере*, 2013, т. 2, № 4, с. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.12737/719>
- [11] Карамзин В.В., Торопов О.А. Теоретический анализ технологических возможностей гидроциклонов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2009, № S15, с. 215–228.
- [12] Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. М., Наука, 1994.
- [13] Колесов В.В., Романов М.Н. Расчет стационарных, периодических и квазипериодических движений вязкой жидкости между двумя вращающимися проницаемыми цилиндрами. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2010, № 6, с. 53–62.
- [14] Xie X., Le Men C., Dietrich N., et al. Local hydrodynamic investigation by PIV and CFD within a dynamic filtration unit under laminar flow. *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 198, pp. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.009>
- [15] Браженко В.М. Теоретическое исследование эффективности механической очистки жидкости ротационным фильтром. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*, 2017, № 12-2, с. 17–22.

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Девисилов Владимир Аркадьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Шарай Елена Юрьевна — старший преподаватель кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Численное исследование течения жидкости между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 32–45. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLUID FLOW BETWEEN ROTATING PERMEABLE CYLINDRICAL SURFACES

A.A. Aleksandrov
V.A. Devisilov
E.Yu. Sharai

rector@bmstu.ru
devisilov@bmstu.ru
e9.sharay@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents numerical simulation results concerning fluid flow in the annular channel of a hydrodynamic filter comprising a perforated protective screen located between another perforated protective screen and a filtering screen, both cylindrical. We investigated the effects of the following two parameters on the flow structure: the perforated area of the protective screen and the width of the annular channel between the protective and filtering cylindrical screens. We established that increasing the annular channel width and the perforation area of the protective screen leads to secondary vortex structures forming in the channel. We obtained circumferential velocity distribution in the channel formed by the protective and filtering screens of the hydrodynamic filter. We show that, in the bracket of modal and design parameters under consideration, a power curve with an exponent in the 2.4–3.3 range may be used to approximate the circumferential velocity profile. We discovered that the structural and modal parameters of the channel between the rotating permeable cylindrical surfaces control the intensity of the deterministic separation process components. Channel width and perforation area are structural parameters; angular velocity is a modal parameter. Arranging the flow in a hydrodynamic filter in the way proposed makes it possible to decrease the intensity of random separation process components in multi-phase media

Keywords

Numerical simulation, vortex structures, hydrodynamic filter, rotating cylinder, annular channel, permeable cylinder, rotating filtering element, separation

Received 19.06.2019

Accepted 02.07.2019

© Author(s), 2019

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of a government order (no. 10.7766.2017/8.9)

REFERENCES

- [1] Tarleton E.S. Progress in filtration and separation. Academic Press, 2014.
- [2] Mochalin E.V., Khalatov A.A. Problems of industrial cleaning of liquids from mechanical impurities and the use of rotary filters. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering, 2009, vol. 31, no. 2, pp. 19–30 (in Russ.).
- [3] Holdich R.G., Cumming I.W., Smith I.D. Crossflow microfiltration of oil in water dispersions using surface filtration with imposed fluid rotation. *J. Memb. Sci.*, 1998, vol. 143, iss. 1-2, pp. 263–274. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00023-4)
- [4] Akagi T., Horie T., Masuda H., et al. Improvement of separation performance by fluid motion in the membrane module with a helical baffle. *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 198, pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.012>
- [5] Jaffrin M.Y. Hydrodynamic techniques to enhance membrane filtration. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2012, vol. 44, pp. 77–96. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101112>
- [6] Ahmari H., Heris S.Z. Numerical analysis of mass and momentum transfer in coaxial cylinders with rotating inner cylinder. *Bulg. Chem. Commun.*, 2015, vol. 47, no. 2, pp. 491–496.
- [7] El Rayess Y., Manon Y., Jitariouk N., et al. Wine clarification with Rotating and Vibrating Filtration (RVF): investigation of the impact of membrane material, wine composition and operating conditions. *J. Memb. Sci.*, 2016, vol. 513, pp. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.058>
- [8] Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Sharai E.Yu., et al. Effect of geometric parameters of working channel of hydrodynamic filter with protective baffle on medium flow structure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, no. 2 (77), pp. 23–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>
- [9] Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Hydrodynamic filtration. *Safety in Technosphere*, 2015, vol. 4, iss. 3, pp. 68–80 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/11885>
- [10] Krokhina A.V., Lvov V.A., Pavlikhin G.P., et al. Research of asymptotic properties related to model of hydrodynamic stage of classification process evolution in cyclonic type devices. *Safety in Technosphere*, 2013, vol. 2, iss. 4, pp. 36–42 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/719>
- [11] Karamzin V.V., Toropov O.A. Theoretical analysis of hydrocyclones technological possibilities of hydroseparators. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2009, no. S15, pp. 215–228 (in Russ.).
- [12] Ternovskiy I.G., Kutepov A.M. *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocyclone]. Moscow, Nauka Publ., 1994.
- [13] Kolesov V.V., Romanov M.N. Calculation of the stationary, periodic, and quasi-periodic viscous fluid flows between two rotating permeable cylinders. *Fluid Dyn.*, 2010, vol. 45, iss. 6, pp. 880–888. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462810060050>

[14] Xie X., Le Men C., Dietrich N., et al. Local hydrodynamic investigation by PIV and CFD within a dynamic filtration unit under laminar flow. *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 198, pp. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.009>

[15] Brazhenko V.M. Theoretical research of the efficiency of a fluid mechanical cleaning by a rotary filter. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*, 2017, no. 12-2, pp. 17–22.

Aleksandrov A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Rector of Bauman Moscow State Technical University, Head of Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Devisilov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sharai E.Yu. — Assist. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Sharai E.Yu. Numerical investigation of fluid flow between rotating permeable cylindrical surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 32–45 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>