

*д.т.н. Мочалин Е.В.,
Мочалина И.Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТЕЙ РОТАЦИОННЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Обґрунтовано можливість модельних випробувань ефективності гідродинамічного очищення рідин ротаційними фільтрами за умов фіксованого складу забруднень. Вказано умови, які дозволяють визначити в масштабному експерименті режими фільтрування натурним фільтром з точністю 6...28%.

***Ключові слова:** завислі домішки, гідродинамічне очищення, ротаційний фільтр, фізична подібність.*

Обоснована возможность модельных испытаний эффективности гидродинамической очистки жидкостей ротационными фильтрами при фиксированном составе исходных загрязнений. Указаны условия, позволяющие определить в масштабном эксперименте режимы фильтрования натурным фильтром с точностью 6...28%.

***Ключевые слова:** взвешенные примеси, гидродинамическая очистка, ротационный фильтр, физическое подобие.*

Характеристика проблемы. Очистка жидкостей от механических примесей является актуальной задачей для всех отраслей промышленности. Особенно большими масштабами нерешенных проблем с очисткой технической воды, смазочно-охлаждающих и других жидкостей отличается горно-металлургический комплекс. Острота проблемы удаления загрязняющих примесей с достаточно высокой тонкостью обусловлена большой стоимостью оборудования. Характерной является ситуация, когда стоимость и затраты на эксплуатацию устройств очистки рабочих жидкостей до требуемого уровня сопоставима со стоимостью технологического оборудования, предназначенного для выпуска основной продукции. Анализ значений тонкости очистки, для которых с одной стороны в полной мере ощущается охарактеризованная выше проблема, а с другой стороны, имеются перспективы ее достаточно экономичного решения, дает диапазон 10...40 мкм. Хотя иногда требуется

более высокая тонкость, однако во всех случаях дорогая субмикронная очистка будет практически неработоспособна без предварительной очистки хотя бы на указанном уровне.

Детальный сопоставительный анализ существующих способов и устройств очистки жидкостей от механических примесей, выполненный в работе [1], показывает, что одними из наиболее перспективных устройств, в которых указанная выше тонкость очистки и работа при высоких уровнях исходной загрязненности сочетается с невысокой стоимостью изготовления и эксплуатации, а также относительно небольшими габаритами, являются гидродинамические фильтры [2]. К последним относятся ротационные фильтры (РФ), в которых гидродинамическая очистка осуществляется вращающимся перфорированным цилиндром. Изучению особенностей течения жидкости и движения взвешенных частиц в РФ посвящены работы [1,3 – 8]. Выявленные закономерности позволили на порядок уменьшить гидродинамическое сопротивление ротационных фильтров и повысить тонкость очистки. Однако практика показывает, что успех применения того или иного способа очистки жидкостей зависит от сочетания очень большого числа различных факторов, не все из которых могут быть отражены даже в самой подробной теоретической постановке. Поэтому наиболее достоверным методом определения фактической эффективности удаления взвешенных примесей в каждой конкретной ситуации является пробное фильтрование с применением масштабной модели. При этом основным является вопрос соблюдения условий физического подобия.

Целью настоящей работы является анализ условий, обеспечивающих подобие при экспериментальных исследованиях эффективности очистки жидкостей ротационными фильтрами.

Основные результаты. Упрощенная схема ротационного фильтра представлена на рисунке 1. Эффективность сепарации взвешенных частиц вращающимся перфорированным цилиндром определяются характером их относительного движения вблизи наружной поверхности цилиндра. Эта задача рассматривалась в работах [9,10] в достаточно подробной постановке, учитывающей не только вязкое сопротивление при обтекании частиц, но и силы инерции, обусловленные криволинейностью траекторий частиц, большие градиенты скорости несущей жидкости и градиент давления вблизи вращающейся поверхности, а также эффект присоединенных масс. В результате получена следующая система безразмерных уравнений, описывающих движение взвешенной частицы:

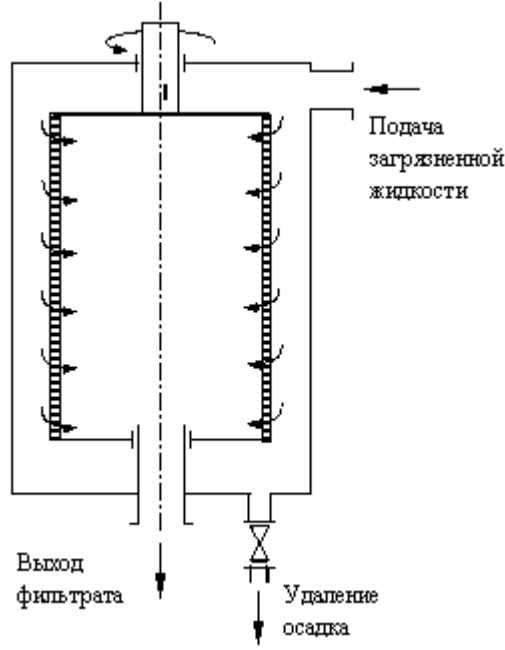


Рисунок 1 – Конструктивная схема ротационного фильтра

$$\frac{dv_{pr}}{d\tilde{r}} = \frac{v_{p\varphi}^2}{v_{pr}\tilde{r}} - \frac{f_1(\tilde{r})}{v_{pr}\tilde{\rho}_p} - \frac{a_0}{\tilde{\rho}_p}, \quad (1)$$

$$\frac{dv_{p\varphi}}{d\tilde{r}} = -\frac{v_{p\varphi}}{\tilde{r}} + \frac{1}{v_{pr}\tilde{\rho}_p} (f_3(\tilde{r}) - a_0 v_{p\varphi}), \quad (2)$$

где

$$f_1(\tilde{r}) = \frac{a_0 v_o}{\tilde{r}} + f_2(\tilde{r}), \quad f_3(\tilde{r}) = a_0 \tilde{r}^{1-\text{Re}_\varphi v_o}, \quad a_0 = \frac{25}{\tilde{d}_p^2 \text{Re}_\varphi},$$

$$f_2(\tilde{r}) = \frac{3}{4\tilde{d}_p(1-\text{Re}_\varphi v_o)} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\tilde{r} + \frac{\tilde{d}_p}{2} \sin \theta \right)^{2-2\text{Re}_\varphi v_o} \sin 2\theta \, d\theta -$$

$$-\frac{6v_o^2}{\tilde{d}_p^3} \left(\ln \frac{\tilde{r} + \tilde{d}_p/2}{\tilde{r} - \tilde{d}_p/2} - \frac{\tilde{r}\tilde{d}_p}{\tilde{r}^2 - \tilde{d}_p^2/4} \right) = \frac{6}{\tilde{d}_p^3} \left[\frac{(\tilde{r} + \tilde{d}_p/2)^{4-2\text{Re}_\varphi v_o} - (\tilde{r} - \tilde{d}_p/2)^{4-2\text{Re}_\varphi v_o}}{(1-\text{Re}_\varphi v_o)(4-2\text{Re}_\varphi v_o)} - \right.$$

$$\left. - \tilde{r} \frac{(\tilde{r} + \tilde{d}_p/2)^{3-2\text{Re}_\varphi v_o} - (\tilde{r} - \tilde{d}_p/2)^{3-2\text{Re}_\varphi v_o}}{(1-\text{Re}_\varphi v_o)(3-2\text{Re}_\varphi v_o)} \right] - \frac{6}{\tilde{d}_p^3} v_o^2 \left[\ln \frac{\tilde{r} + \tilde{d}_p/2}{\tilde{r} - \tilde{d}_p/2} - \frac{\tilde{r}\tilde{d}_p}{\tilde{r}^2 - \tilde{d}_p^2/4} \right].$$

Через \tilde{r}, \tilde{d}_p обозначены текущая радиальная координата и эквивалентный диаметр частицы, отнесенные к радиусу фильтрующего цилиндра.

дра R , $\tilde{\rho}_p = \rho_p / \rho$ – относительная плотность частицы (отношение плотности частицы к плотности жидкости), $v_{pr}, v_{p\phi}$ – отнесенные к окружной скорости фильтрующей поверхности ($W = \Omega R$) радиальная и окружная компоненты скорости взвешенной частицы, $Re_\phi = WR/\nu$ – вращательное число Рейнольдса, $v_o = V_o/W$ – безразмерная скорость фильтрования (V_o – физическая скорость фильтрования, определяемая отношением расхода жидкости к площади поверхности фильтрующего цилиндра).

Численное интегрирование уравнений (1),(2) с начальными условиями, соответствующими отсутствию скольжения фаз за пределами пограничного слоя у вращающегося цилиндра, позволяет получать траектории и изменение скорости частицы вблизи фильтрующей поверхности [10]. Для оценки тонкости гидродинамической очистки при фиксированном размере отверстий в фильтрующей перегородке в работе [2] предложено использовать отношение радиальной и касательной к фильтрующей поверхности компонент относительной скорости частиц в момент их соприкосновения с поверхностью. Для ротационных фильтров это отношение можно представить в следующем виде:

$$k_{vp} = \left(\frac{v_{pr}}{1 - v_{p\phi}} \right)_{\tilde{r}=1+\frac{\tilde{d}_p}{2}} \cdot \quad (3)$$

Определенную таким образом величину будем называть коэффициентом эффективности гидродинамической очистки. Чем меньше абсолютная величина этого коэффициента, тем большим будет отношение размера проходных отверстий к размеру частиц, не проходящих в эти отверстия (выше тонкость очистки). Такая оценка является упрощенной и детерминированной и не учитывает ряд факторов, которые можно количественно оценивать только с привлечением статистических методов, однако она хорошо зарекомендовала себя в практике разработки гидродинамических фильтров различных конструкций.

Из уравнений (1),(2) видно, что движение частиц в рассматриваемых условиях полностью определяется четырьмя безразмерными параметрами: $Re_\phi, v_o, \tilde{\rho}_p, \tilde{d}_p$. Их совпадение для модельного эксперимента и натурального фильтра обеспечивает идентичность результатов, касающихся, в частности, эффективности гидродинамической очистки жидкости (в терминах введенного коэффициента k_{vp}). Однако здесь возникает трудность, которая видна из следующего примера. Если необходимо отработать режим очистки жидкости от частиц размером, скажем, 20 мкм на модели с радиусом проникаемого цилиндра в 5 раз меньшим, чем у

натурного фильтра, то для выполнения условия $\tilde{d}_p = idem$ следует в модельном эксперименте использовать взвешенные частицы диаметром 4 мкм. При этом для исследования гидродинамической очистки нужно пропорционально уменьшать и размеры отверстий в фильтрующем цилиндре (например, с 40 мкм до 8 мкм), что чрезвычайно затруднительно. Кроме этого на движение взвешенных частиц размером < 10 мкм может оказывать влияние ряд неучтенных в рассмотренной здесь постановке факторов, например, силы адгезии и броуновское движение, в связи с чем полученные на модели результаты некорректно переносить на натурные условия.

Намного удобнее использовать в модельном эксперименте тот же фактический состав загрязнений, для очистки от которых разрабатывается натуральный фильтр, хотя при этом, очевидно, не соблюдается полное подобие. Оценим возможность применения такого подхода, учитывая практическую важность поставленного вопроса.

При сохранении исходного состава загрязнений и типоразмера фильтрующей цилиндрической перегородки логичным представляется для сопоставимых режимов работы модельного и натурального фильтров использовать одинаковое значение физической скорости фильтрации V_o . Будем в следующих ниже рассуждениях отмечать штрихом значения величин, относящиеся к натурному образцу большего масштаба. Соответствующие значения для модели меньшего размера будем обозначать обычным образом (без штриха). Если соотношение линейных размеров модельного и натурального фильтроэлемента равно k_L , тогда, при сохранении физического размера частиц и их относительной плотности, можно записать:

$$R' = k_L R, \quad \tilde{d}'_p = \tilde{d}_p / k_L, \quad \tilde{\rho}'_p = \tilde{\rho}_p. \quad (4)$$

Из условия $V_o = idem$ и первого из равенств (4) следует

$$v'_o = k_L v_o \frac{Re_\phi}{Re'_\phi}. \quad (5)$$

Отношение вращательных чисел Рейнольдса для модельной и натурной задач связано с отношением угловых скоростей фильтроэлемента ротационного фильтра следующим равенством:

$$\frac{\Omega'}{\Omega} = \frac{1}{k_L^2} \frac{Re'_\phi}{Re_\phi}. \quad (6)$$

Задавшись фиксированным значением коэффициента эффективности гидродинамической очистки k_{vp} можно для частиц с относительным размером \tilde{d}_p и плотностью $\tilde{\rho}_p$ путем решения рассмотренной выше задачи подобрать значения Re_φ и v_o , которые обеспечивают выбранное значение k_{vp} (заметим, что сочетаний Re_φ и v_o , удовлетворяющих этому условию может быть много). Считая, что рассчитанные значения соответствуют модельной задаче, можно перейти к рассмотрению натуральных условий на основе масштабного коэффициента k_L и условия постоянства физической скорости отсоса и физического размера частиц. При этом значения безразмерных величин \tilde{d}'_p и $\tilde{\rho}'_p$ определяются равенствами (4). Учитывая связь между Re'_φ и v'_o , устанавливаемую равенством (5), можно подобрать такое их значение, которое будет обеспечивать установленное значение k_{vp} , такое же, как и для модельной задачи. В заключение, на основе равенства (6) можно определить требуемое из условия постоянства значения k_{vp} отношение угловых скоростей модельного и натурального фильтроэлементов.

Такие расчеты были проведены для двух значений коэффициента k_{vp} ($k_{vp} = -0.05, k_{vp} = -0.025$) и двух значений относительной плотности ($\tilde{\rho}_p = 2, \tilde{\rho}_p = 5$). Для модельной задачи был выбран характерный размер частицы $\tilde{d}_p = 5 \cdot 10^{-4}$. Числа Рейнольдса Re_φ в каждом варианте определялись для трех значений параметра v_o ($v_o = 0.005, v_o = 0.01, v_o = 0.02$) таким образом, чтобы каждый раз были обеспечены установленные значения k_{vp} . В результате расчетов для трех значений масштабного фактора k_L ($k_L = 2.5, k_L = 5, k_L = 8$) находились отношения угловых скоростей Ω'/Ω , которые обеспечивают сохранение значений коэффициента эффективности k_{vp} . Результаты расчета отражены в графиках на рисунках. 2, 3. Сплошной линией отображена обратно-пропорциональная зависимость

$$\frac{\Omega'}{\Omega} = \frac{R_1}{R'_1} = \frac{1}{k_L}. \quad (7)$$

Зависимость (7) соответствует условию $W = idem$ постоянства окружной скорости точек вращающейся поверхности.

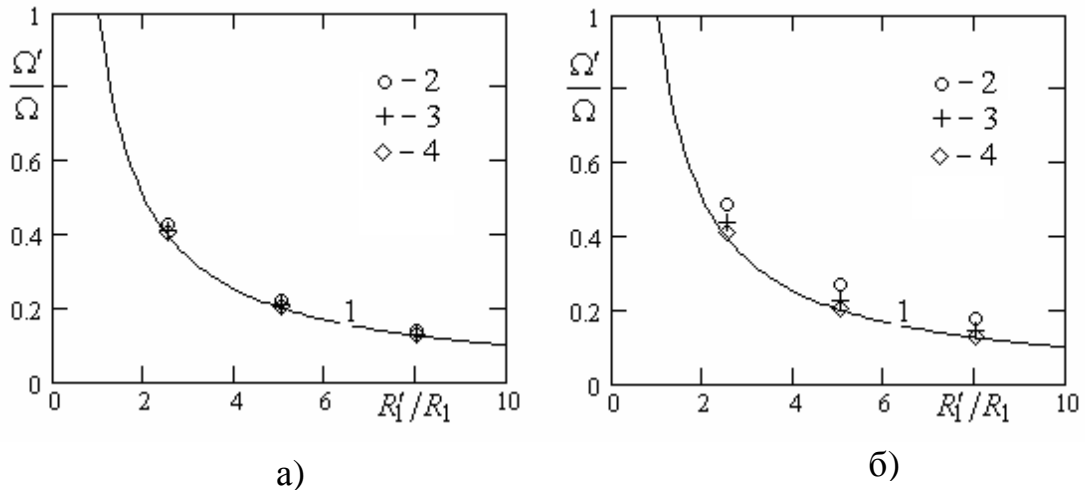


Рисунок 2 – Зависимость изменения угловой скорости фильтрующего цилиндра от изменения его радиуса при условии $k_{vp} = -0.05 = idem$

для значений $\tilde{\rho}_p = 2$ (а) и $\tilde{\rho}_p = 5$ (б):

1 – $\Omega'/\Omega = R_1/R_1'$; 2 – $v_o = 0.005$; 3 – $v_o = 0.01$; 4 – $v_o = 0.02$

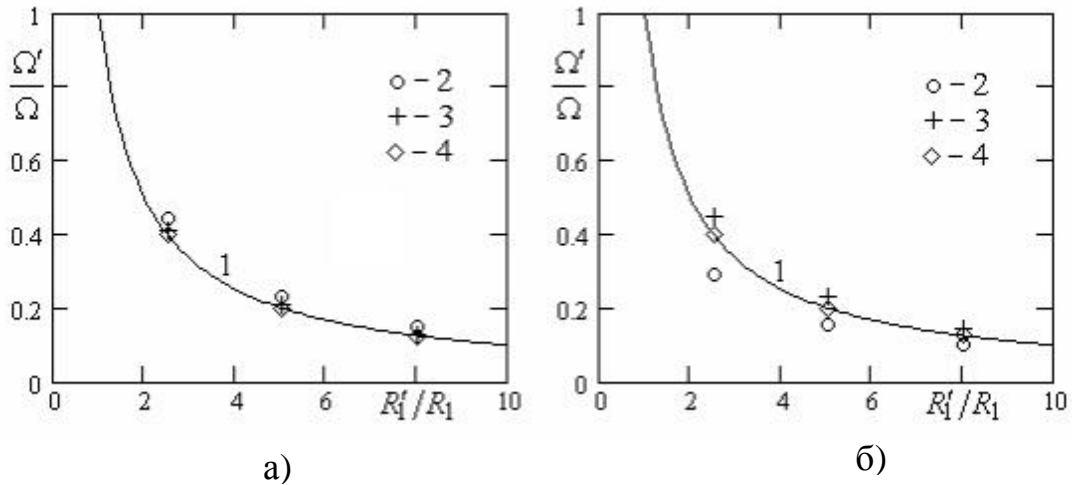


Рисунок 3 – Зависимость изменения угловой скорости отсасывающего цилиндра от изменения его радиуса при условии

$k_{vp} = -0.025 = idem$ для значений $\tilde{\rho}_p = 2$ (а) и $\tilde{\rho}_p = 5$ (б):

1 – $\Omega'/\Omega = R_1/R_1'$; 2 – $v_o = 0.005$; 3 – $v_o = 0.01$; 4 – $v_o = 0.02$

Выводы. Анализ результатов выполненных расчетов позволяет установить следующее:

– при физическом моделировании процесса гидродинамической очистки жидкостей вращающимся проницаемым цилиндром допустимо переносить результаты модельного эксперимента на образец другого

размера в условиях постоянства состава загрязнений и средней скорости фильтрования жидкости;

– хорошим приближением значения угловой скорости фильтроэлемента натурального фильтра, обеспечивающей достигнутую в модельном эксперименте эффективность гидродинамической очистки, является значение, полученное из условия постоянства окружной скорости вращающейся поверхности;

– точность такого приближения растет с уменьшением относительной плотности взвешенных частиц (в рассмотренных вариантах погрешность составила от 6 до 28%).

Библиографический список

1. Мочалин Е.В. Проблемы промышленной очистки жидкостей от механических загрязнений и применение ротационных фильтров / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов // *Промышленная теплотехника.*– 2009.– Т. 31, №2.– С. 57 – 69.

2. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин / З.Л. Финкельштейн.– М.: Недра, 1986.– 232 с.

3. Мочалин Е.В. Гидродинамическая устойчивость в рабочей полости ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // *Промислова гідравліка і пневматика.*– 2005.– №4(10).– С. 50 – 54.

4. 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.

5. Мочалин Е.В. Влияние конструкции фильтроэлемента ротационного фильтра на гидродинамический эффект очистки жидкости / Е.В. Мочалин // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.*– 2007.– № 5/3 (29).– С. 46 – 51.

6. Мочалин Е.В. Моделирование переходных течений жидкости в сечении вращающегося сетчатого фильтроэлемента / Е.В. Мочалин // *Вісник Східноукраїнського національного університету.*– 2007.– №3(109).– С. 99 – 110.

7. Мочалин Е.В. Расчет турбулентного пограничного слоя на поверхности фильтроэлемента ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // *Вісник Сумського державного університету.*– 2007.– №3.– С. 57 – 69.

8. Мочалин Е.В. Сопротивление вращению фильтроэлемента ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // *Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник.*– Дніпропетровськ: НГУ, 2007.– № 79.– С. 133 – 140.

9. Мочалин Е.В. К постановке задачи о движении взвешенной частицы в закрученном потоке несущей жидкости между двумя соос-

ными цилиндрами с учетом отсоса жидкости через внутренний цилиндр / Е.В. Мочалин, А.А. Бревнов // Сб. науч. трудов ДГМИ.– Алчевск: ДГМИ, 2001.– Вып. 13.– С. 210 – 218.

10. Мочалин Е.В. Исследование движения взвешенных частиц вблизи вращающегося отсасывающего цилиндра / Е.В. Мочалин // Промислова гідравліка і пневматика.– 2005.– №2(8).– С. 61 – 65.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Литвинским Г.Г.