

УДК 62-73+628.16.06

Е.В. МОЧАЛИН, докт. техн. наук, доц., зав. кафедрой, Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск

И.Г. МОЧАЛИНА, ст. преп., Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ ВРАЩАЮЩИМСЯ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОМ

Исследованы особенности развития вторичных течений снаружи вращающегося проницаемого цилиндра в ротационном фильтре очистки жидкостей. Обнаружены причины ограниченного проявления гидродинамического эффекта очистки. Указан путь повышения эффективности применения ротационных фильтров на основе определения границы центробежной устойчивости потока в зоне отделения примесей.

Ключевые слова: ротационный фильтр, устойчивость, численный анализ.

Досліджено особливості розв'язку вторинних течій зовні обертового проницного циліндра в ротатійному фільтрі очищення рідин. Виявлено причини обмеженого прояву гідродинамічного ефекту очищення. Вказано шлях підвищення ефективності застосування ротатійних фільтрів на основі визначення межі відцентрової стійкості потоку в зоні відокремлення домішок.

Ключові слова ротатійний фільтр, стійкість, чисельний аналіз.

The features of secondary flow development outside of rotating permeable cylinder in rotary filter for cleaning of liquids are investigated. The cause is found of limited nature of cleaning hydrodynamic effect. The way of efficiency increasing of rotary filter application is shown on the base of the flow centrifugal stability bound determination.

Key words: rotary filter, stability, numerical analysis.

1. Характеристика проблемы и задачи исследования

На предприятиях всех отраслей промышленности и в коммунальном хозяйстве очень остро стоят вопросы очистки жидкостей от механической примесей. Эта проблема усложняется с повышением требуемой тонкости очистки и объемов очищаемой жидкости. Достаточно сказать, что очень часто стоимость устройств очистки, необходимой для нормального функционирования различного оборудования, сравнима со стоимостью самого оборудования, что во многих случаях не позволяет организовывать очистку жидкостей на должном уровне.

Большие перспективы в плане относительно недорогой и достаточно тонкой очистки имеют гидродинамические полнопоточные самоочищающиеся фильтры с вращающимся фильтрующим цилиндром [1]. Такие фильтры еще называют ротационными фильтрами [2]. Упрощенная схема ротационного фильтра (РФ) представлена на рис. 1.

В РФ за счет вращения фильтрующего элемента (цилиндра с проницаемой боковой поверхностью) частицы примесей вблизи его поверхности имеют

касательную составляющую относительной скорости. Тем самым обеспечивается

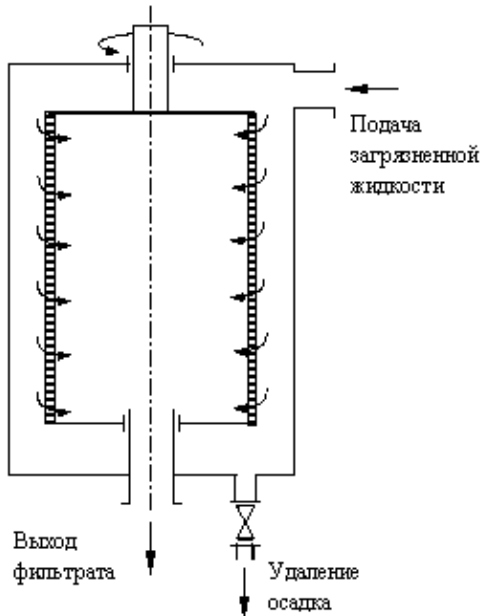


Рис. 1. Конструктивная схема ротационного фильтра

постоянная самоочистка фильтрующей поверхности и появляется возможность сепарации частиц, размер которых меньше размера отверстий в фильтрующей перегородке. В совокупности это называют [1] гидродинамическим эффектом очистки. В первом приближении эффективность гидродинамической очистки или степень проявления гидродинамического эффекта в ротационном фильтре можно оценить через отношение радиальной и окружной компонент скорости частицы относительно вращающегося цилиндра при

соприкосновении с его поверхностью:

$$k_{vp} = \left(\frac{V_{pr}}{W - V_{p\phi}} \right)_{r=R + \frac{d_p}{2}}, \quad (1)$$

где r – радиальная координата, R – наружный радиус вращающегося фильтрующего цилиндра, $W = \Omega R$ – окружная скорость фильтрующей поверхности, $d_p, V_{pr}, V_{p\phi}$ – эквивалентный диаметр и проекции скорости частицы.

Величина k_{vp} , определяемая выражением (1), названа в работе [3] коэффициентом эффективности гидродинамической очистки. Там же показано, что со средней погрешностью порядка 15% можно заменить k_{vp} аналогичным коэффициентом

$$k_v = \left(\frac{V_r}{W - V_\phi} \right)_{r=R + \frac{d_p}{2}}, \quad (2)$$

в определение которого вместо проекций скорости частицы входят проекции скорости несущей жидкости (V_r, V_ϕ) на расстоянии радиуса частицы от вращающейся поверхности.

Чем меньше абсолютное значение коэффициентов эффективности гидродинамической очистки k_{vp}, k_v , при их отрицательном знаке (с учетом знака радиальной скорости), тем большее значение тонкости очистки имеет место. Заметим, что положительный знак этих коэффициентов соответствует течению жидкости изнутри цилиндра наружу.

Расчеты, справедливые для устойчивого ламинарного течения жидкости вблизи фильтрующей поверхности, демонстрируют возможность при умеренных угловых скоростях (в частности, соответствующих $W \sim 10$ м/с) получить увеличение тонкости очистки более, чем в 5 раз по сравнению с размером

отверстий в фильтрующей перегородке. Однако практика применения РФ и экспериментальные исследования [4] показывают, что с ростом угловой скорости эффективность очистки ограниченно возрастает и после некоторого предела начинает уменьшаться. В частности, фильтром с сетчатым цилиндром и размером ячейки сетки в 40 мкм не удастся обеспечить удаление более чем 80% частиц размером 25 мкм. Это говорит о том, что распределение компонент скорости жидкости вдоль всей поверхности вращающегося фильтрующего цилиндра, либо вдоль ее части, не соответствует устойчивому ламинарному течению.

Еще в работе [1] применительно к ротационным фильтрам указывается на возможность центробежной потери устойчивости потоком снаружи вращающегося цилиндра с образованием вихревых структур (макровихрей) по типу вихрей Тейлора. В работе [5] определена граница возникновения макровихрей в виде нейтральной кривой в плоскости Re_ϕ, v_o , где $Re_\phi = (WR)/\nu$ – окружное (вращательное) число Рейнольдса, а $v_o = |V_r(R)|/W$ – безразмерная скорость фильтрования (отсоса жидкости). В монографии [3] на основе этой нейтральной кривой получено аналитическое выражение для критической скорости фильтрования в зависимости от числа Re_ϕ :

$$(v_o)_{cr} = 0.26 Re_\phi^{-0.35} + 3.3 \cdot 10^{-4}. \quad (3)$$

При $v_o < (v_o)_{cr}$ в кольцевой области снаружи вращающегося проницаемого цилиндра возникают макровихревые структуры.

Целью настоящей работы является изучение особенностей макровихревого движения жидкости в зоне отделения примесей ротационного фильтра и эффективности гидродинамической очистки в этих условиях.

2. Основные результаты исследования

Выше было отмечено, что коэффициент k_v , определяемый на основе решения гидродинамической задачи о течении несущей жидкости, достаточно хорошо характеризует эффективность отделения частиц с размерами меньшими размера отверстий во вращающемся цилиндре. Одной из основных проблем при решении задачи о движении жидкости в окрестности вращающегося фильтрующего цилиндра является смена режимов течения – от устойчивого ламинарного до ламинарных и турбулентных макровихревых движений. В работе [6] получено численное решение этой задачи по методу конечных объемов. При этом обоснованы все основные схемные подходы и способы аппроксимации всех членов в разрешающих уравнениях. В основу моделирования положены полные уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного течения несжимаемой жидкости, записанные во вращающейся вместе с цилиндром системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}_e - \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}), \quad (4)$$

где \mathbf{V}, \mathbf{U} – векторы абсолютной и относительной осредненных скоростей жидкости; ρ, p – плотность и осредненное давление; $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор угловой скорости подвижной системы координат (вращающегося цилиндра). Эффективный тензор сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\mathbf{T}_e = \mu_e \left(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T \right) - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I},$$

где k – удельная кинетическая энергия пульсационного движения (кинетическая энергия турбулентности); I – тензорная единица; $\mu_e = \mu + \mu_t$ – эффективный коэффициент динамической вязкости, равный сумме соответствующих коэффициентов молекулярной и турбулентной вязкости.

Уравнение (4) дополняется уравнением неразрывности

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (5)$$

Для получения замкнутой системы необходимы также дополнительные соотношения, определяемые подходящей моделью турбулентности. В работе [7] показано, что для течений рассматриваемого типа применение модели переноса сдвиговых напряжений (SST k – ω модель) Ментера обеспечивает адекватный расчет осредненных гидродинамических характеристик во всем диапазоне возможных режимов течения. При этом показано, что численное решение с применением этой модели способно воспроизводить ламинарное течение при соответствующих условиях. Дифференциальные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости ее диссипации ω , а также все алгебраические соотношения модели Ментера мы здесь приводить не будем в силу их громоздкости и специфичности этого вопроса. Достаточно подробное его изложение можно найти в монографии [3].

Численное моделирование течения жидкости в зоне отделения примесей ротационного фильтра проводилось в осесимметричной постановке на основе расчетной схемы, приведенной на рис. 2.

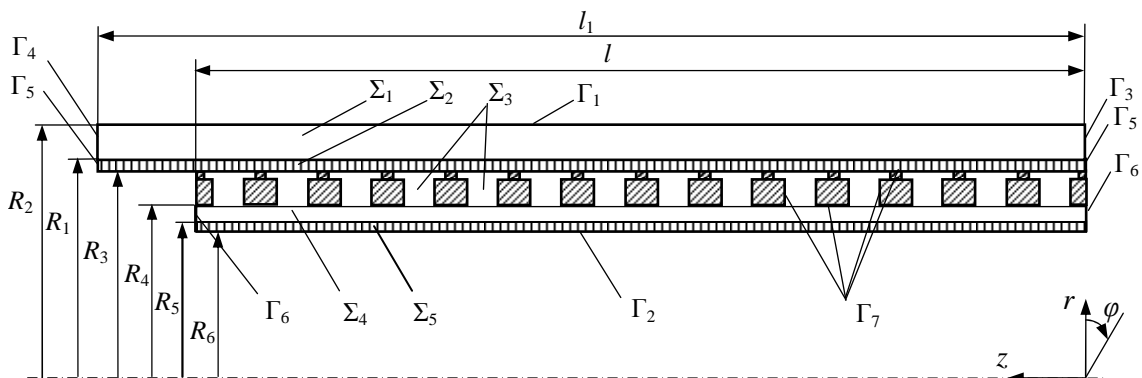


Рис. 2. Расчетная схема течения в окрестности вращающегося пористого цилиндра, состоящего из каркаса и фильтрующей перегородки

Для расчетного представления фильтрующей перегородки (область Σ_2) использована так называемая модель «пористой зоны», рассмотренная в [3]. В конструкции РФ, соответствующей схеме на рис. 2, внутри вращающегося фильтрующего элемента размещена неподвижная пористая вставка (область Σ_5), которая существенно снижает гидравлическое сопротивление фильтра. Для ее представления так же использована модель «пористой зоны».

Граничные условия для уравнений движения (4) и неразрывности (5) сформулируем в виде:

$$\begin{aligned} \Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_6: V_r = V_\varphi = V_z = 0, \\ \Gamma_2: p = 0, \end{aligned}$$

$$\Gamma_3: V_r = V_\varphi = 0, V_z = Q / (R_2^2 - R_1^2) = v_o 2\Omega R_1^2 l k_{sf} / (R_2^2 - R_1^2),$$

$$\Gamma_5, \Gamma_7: V_r = V_z = 0, V_\varphi = \Omega r,$$

где Q – секундный объемный расход жидкости, k_{sf} – коэффициент живого сечения каркаса фильтрующего цилиндра, а безразмерная скорость фильтрования v_o определяется по всей поверхности фильтрующей перегородки, расположенной над отверстиями в каркасе.

Для уравнений переноса характеристик турбулентности (k, ω) использованы граничные условия

$$\Gamma_3: k = \frac{3}{2} \left(\frac{0.01Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right)^2, \quad \omega = \frac{\sqrt{k}}{R_2 - R_1},$$

$$\Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7: \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad \omega = 10 \frac{6\mu}{\rho \beta_{i,1} \Delta y^2},$$

где Δy – пристеночный шаг сетки, $\beta_{i,1} = 0.075$ – константа модели. Заметим, что последние условия на твердых стенках справедливы в том случае, когда Δy существенно меньше толщины ламинарного подслоя.

При обобщении результатов расчетного моделирования вместо размерных величин Q или $V_{z0} = Q / \pi(R_2^2 - R_1^2)$ рассматривалось осевое число Рейнольдса $Re_z = V_{z0}(R_2 - R_1) / \nu$. Особенности перехода к макровихревым движениям снаружи вращающегося фильтрующего цилиндра при осевой подаче жидкости в кольцевую область видны из представленных на рис. 3 линий тока относительного движения жидкости (во вращающейся вместе с цилиндром системе координат).

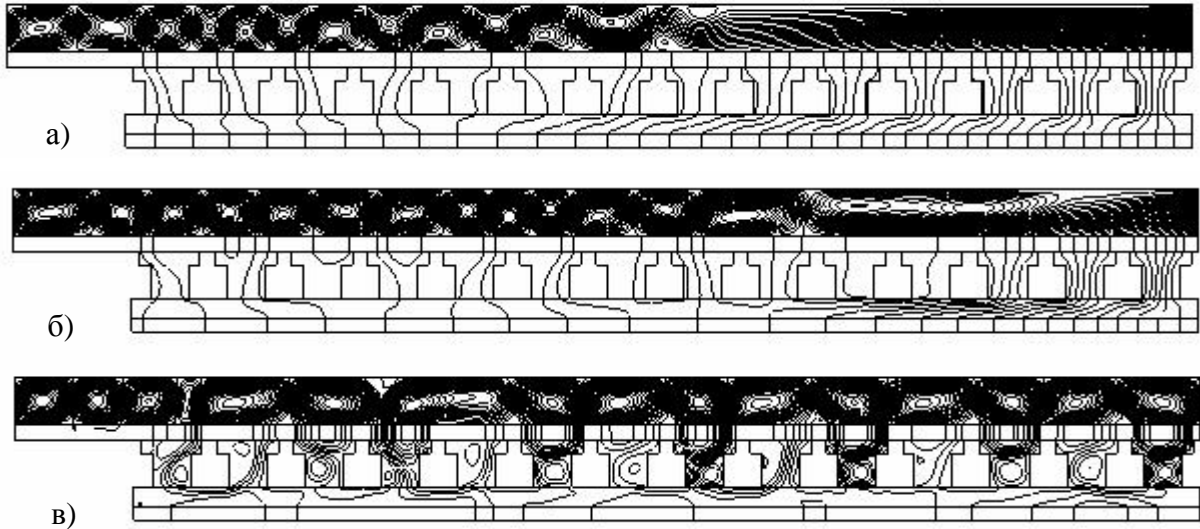


Рис. 3. Линии тока относительного движения жидкости при $Re_\varphi = 5 \cdot 10^4$, $v_o = 0.005$, $Re_z = 500$ (а), $Re_\varphi = 5 \cdot 10^4$, $v_o = 0.0023$, $Re_z = 225$ (б) и $Re_\varphi = 5 \cdot 10^5$, $v_o = 0.0005$, $Re_z = 500$ (в)

Сочетания Re_φ и $v_o = Q / (2\pi\Omega R_1^2 l k_{sf})$, для которых получены приведенные результаты, соответствуют области неустойчивости первичного ламинарного течения в терминах нейтральной кривой (3). С увеличением угловой скорости и

уменьшением расхода жидкости интенсивность вторичных течений возрастает и макровихревые структуры занимают все большую часть кольцевой области, приближаясь ко входному сечению. В зоне вторичных течений поток перетекает через фильтрующую перегородку в обоих направлениях, а поступающая через входное сечение жидкость фильтруется через перегородку на том ее участке, который предшествует области макровихревого движения. Это особенно наглядно видно из представленных на рис.4 относительных траекторий жидких частиц, пересекающих входное сечение. При определенных условиях (рис. 4 в) из всей поверхности фильтрующего цилиндра работает только ее очень узкая кольцевая полоска вблизи входного сечения.

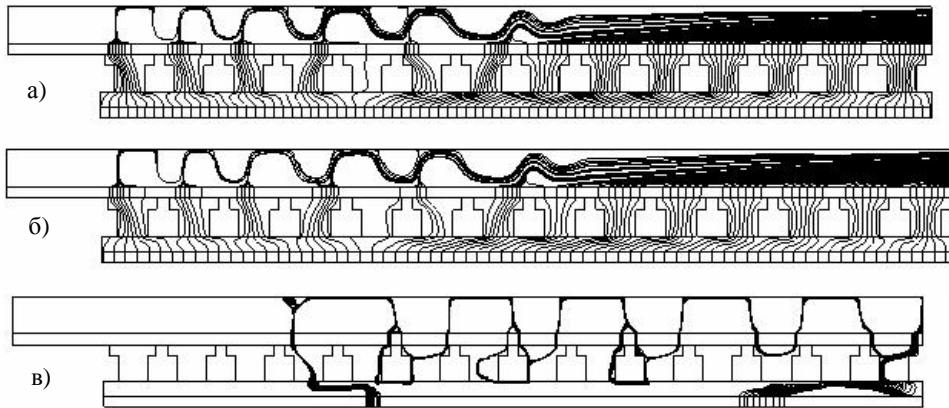


Рис. 4. Траектории жидких частиц, проходящих через входное сечение, для значений определяющих параметров: $Re_\phi = 5 \cdot 10^4$, $\nu_o = 0.005$, $Re_z = 500$ (а); $Re_\phi = 5 \cdot 10^4$, $\nu_o = 0.0023$, $Re_z = 225$ (б); $Re_\phi = 5 \cdot 10^5$, $\nu_o = 0.0005$, $Re_z = 500$ (в)

Следует ожидать, что локальные значения скорости фильтрации намного выше расчетного значения, а эффективность гидродинамической очистки намного меньше. Это подтверждается приведенным на рис. 5 распределением коэффициента эффективности гидродинамической очистки, определяемого выражением (2) при $d_p/2 = 0.002R_1$, вдоль поверхности цилиндра.

Для условий устойчивого ламинарного течения с равномерным распределением скорости фильтрации по всей поверхности фильтроэлемента $k_v = -0.005$.

Таким образом, в условиях макровихревого движения большая часть поверхности фильтроэлемента может быть исключена из работы с ухудшением почти в 100 раз коэффициента эффективности, характеризующего степень повышения тонкости очистки за счет гидродинамического эффекта.

3. Выводы

Показано, что переход к макровихревому движению в зоне отделения

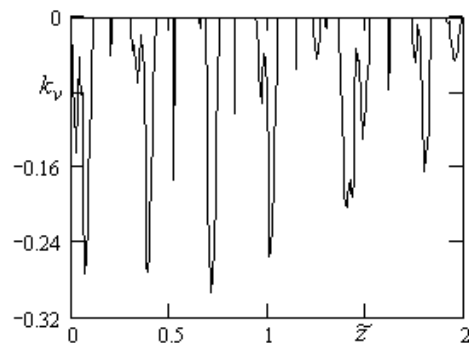


Рис. 5. Изменение коэффициента эффективности гидродинамической очистки вдоль поверхности цилиндра ($\tilde{r} = 1.002$, $Re_\phi = 5 \cdot 10^5$, $\nu_o = 0.0005$, $Re_z = 500$)

примесей ротационного фильтра в результате центробежной неустойчивости, исключает из работы значительную часть рабочей поверхности фильтроэлемента с увеличением фактической скорости фильтрования. Это объясняет наблюдаемый факт ограниченной эффективности гидродинамической очистки РФ. Повышения эффективности сепарации взвешенных частиц ротационными фильтрами можно добиться путем выбора расчетных режимов работы фильтра, определяемых сочетанием безразмерных параметров Re_{ϕ}, v_o , соответствующих отсутствию макровихревых структур у рабочей поверхности вращающегося фильтрующего цилиндра. При расчете требуемых значений указанных параметров в качестве первого приближения можно использовать аналитическое представление (3) нейтральной кривой устойчивости. Однако следует иметь в виду, что наличие непроницаемых участков поверхности вращающегося цилиндра (например, в местах контакта фильтрующей перегородки с каркасом) приводит к увеличению критических значений средней скорости фильтрования v_o . В работе [5] показано, что в этом случае при определении $(v_o)_{cr}$ достаточно использовать коэффициент запаса, зависящий от коэффициента живого сечения каркаса фильтрующего элемента. В частности, при значении $k_{sf} = 0.8$ значения $(v_o)_{cr}$, определяемые выражением (3) необходимо умножать на 6, а при $k_{sf} = 0.5$ – на 14.

Для дальнейших исследований в направлении повышения эффективности механической очистки жидкостей ротационными фильтрами большой интерес представляет определение более точной количественной характеристики степени повышения тонкости очистки за счет гидродинамического эффекта, способной отражать возможное влияние таких факторов, как геометрическая неоднородность фильтрующей поверхности и взаимодействие частиц между собой и с поверхностью.

Список литературы: 1. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин [Текст]/ З.Л. Финкельштейн.– М.: Недра, 1986.– 232 с. 2. Мочалин Е.В. Проблемы промышленной очистки жидкостей от механических загрязнений и применение ротационных фильтров / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов [Текст]// Промышленная теплотехника.– 2009.– Т. 31, №2.– С. 57 – 69. 3. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]/ Е.В. Мочалин, А.А. Халатов.– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010.– Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах.– 428 с. 4. Исследование эффективности тонкой очистки жидкостей ротационными фильтрами [Текст]/ Е.В. Мочалин, А.В. Петренко, П.Н. Кривошея, Е.О. Иванова //Сб. науч. трудов ДонГТУ.– Алчевск: ДонГТУ, 2006.– Вып. 20.– С. 292 – 304. 5. Мочалин Е.В. Гидродинамическая устойчивость в рабочей полости ротационного фильтра [Текст]/ Е.В. Мочалин // Промислова гідравліка і пневматика.– 2005.– №4(10).– С. 50 – 54. 6. Мочалин Е.В. Численное моделирование течений вязкой жидкости в рабочей полости ротационного фильтра [Текст]/ Е.В. Мочалин // Сб. науч. трудов ДонГТУ.– Алчевск: ДонГТУ, 2007.– Вып. 23.– С. 169 – 183. 7. Мочалин Е.В. Выбор модели турбулентности для анализа течения снаружи вращающегося проницаемого цилиндра [Текст]/ Е.В. Мочалин // Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2007.– № 2/6 (26).– С. 20 – 26.

Поступила в редколлегию 19.03.2011