

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ СНАРУЖИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СЕТЧАТОГО ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТА

Е.В. Мочалин¹

Проведено численное моделирование нестационарного осесимметричного течения жидкости в зоне отделения примесей ротационного гидродинамического фильтра. Показано, что наличие нерабочих участков поверхности в реальных конструкциях вращающихся фильтрующих элементов приводит к значительному снижению запаса устойчивости течения в рабочей полости фильтра. Выполнен сопоставительный анализ двух вариантов конструкции фильтроэлемента с точки зрения стабилизации течения и эффективности гидродинамической очистки жидкости ротационным фильтром.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ И ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из самых актуальных технических проблем была и остается проблема эффективной и экономичной очистки жидкостей от механических примесей.

Относительно малыми затратами при достаточно тонкой очистке отличается использование так называемых гидродинамических самоочищающихся фильтров. Под гидродинамической очисткой понимают такую схему фильтрования, когда очищаемой жидкости, несущей частицы примесей, в окрестности сетчатого фильтроэлемента сообщается касательная к его поверхности относительная скорость [1]. Чем больше отношение касательной компоненты скорости жидкости относительно фильтрующей поверхности к нормальной, определяющей скорость фильтрования, тем больше гидродинамический эффект, который заключается в непрерывном удалении осадка и повышении тонкости очистки в том смысле, что через ячейки фильтровальной сетки не проходят частицы с размером, меньшим, чем размеры самих ячеек.

В настоящее время достаточно хорошо зарекомендовали себя гидродинамические фильтры, в которых касательная скорость обеспечивается за счет непрерывного сброса части жидкости на слив вместе со шламом [1]. Такая схема является неполнопоточной и предусматривает слив некоторой части подаваемой на очистку жидкости мимо потребителя, что не всегда приемлемо.

В то же время известна конструкция полнопоточного гидродинамического фильтра, в котором необходимая касательная компонента относительной скорости обеспечивается за счет вращения фильтроэлемента. Такие фильтры еще называют ротационными фильтрами. На рис.1 приведена одна из возможных конструктивных схем ротационного фильтра. На гидродинамическом неполнопоточном фильтре за счет создания транзитного потока в осевом направлении можно достичь повышения тонкости очистки от 2 до 10 раз по сравнению с размером ячеек сетки. Чем выше тонкость, тем больше жидкости уходит на слив. В ротационном фильтре потенциально имеется возможность создания значительно большей относительной касательной скорости в окружном направлении без необходимости постоянного слива части жидкости.

¹ Канд. физ.-мат. наук, Донбасский государственный технический университет.

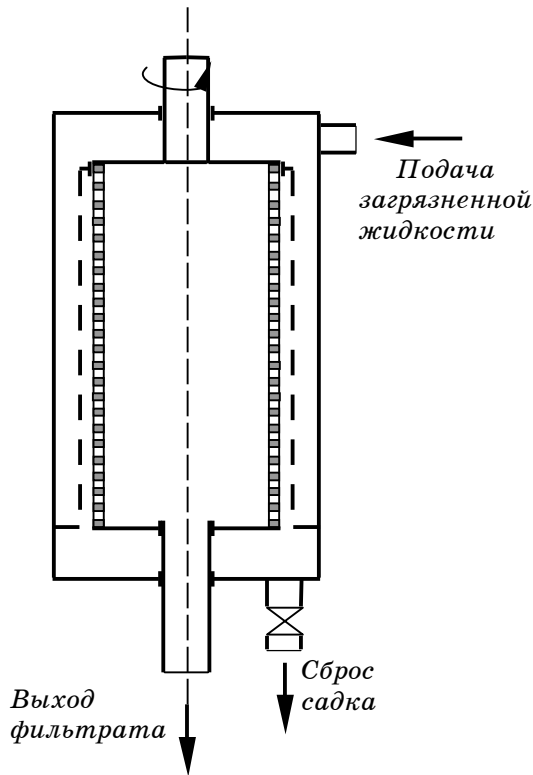


Рисунок 1 – Конструктивная схема фильтра с вращающимся фильтроэлементом

Однако опыт эксплуатации и результаты специальных исследований [2] говорят об ограниченном проявлении гидродинамического эффекта очистки в ротационных фильтрах. В частности, в работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований, из которых следует, что при очистке воды от частиц электрокорунда с размером 20-30 мкм ротационным фильтром с размером ячеек сетки 40 мкм не удалось получить эффективность очистки более 80%. При этом исследовался широкий диапазон изменения угловой скорости фильтроэлемента и несколько значений расхода жидкости, которым определяется скорость фильтрования. Это обстоятельство снижает конкурентоспособность ротационных фильтров при тонкой очистке жидкостей.

Одной из вероятных причин недостаточного проявления гидродинамического эффекта очистки в рассматриваемых фильтрах является потеря устойчивости ламинарного течения в зоне отделения примесей. Такое предположение было высказано в работе [1] и обусловлено тем, что рабочая зона, как видно из рис.1, представляет собой кольцевой зазор между вращающейся внутренней и неподвижной наружной цилиндрическими поверхностями. Такого рода течения склонны к потере устойчивости с образованием тороидальных вихрей (вихрей Тейлора). В случае непроницаемых поверхностей неустойчивость проявляется при весьма небольших угловых скоростях вращения. В ротационном фильтре на поверхности вращающегося цилиндра имеет место интенсивный отсос жидкости, что является, как известно, стабилизирующим фактором. Таким образом, представляет интерес исследование устойчивости течения в кольцевой области между неподвижной наружной поверхностью (в рассматриваемой конструкции проницаемой для подвода жидкости) и вращающейся внутренней поверхностью, через которую осуществляется интенсивный отсос.

В работах [3],[4] выполнено математическое обоснование, реализация и тестирование численного решения обобщенной задачи на собственные значения, соответствующей в рамках линейной теории гидродинамической устойчивости охарактеризованной выше проблеме. В работе [5] на этой основе построены нейтральные кривые устойчивости для ротационных фильтров с различным соотношением радиуса фильтроэлемента и высоты кольцевой области. В этих исследованиях скорость отсоса жидкости считалась равномерно распределенной по всей

поверхности вращающегося цилиндра, а основное (невозмущенное) течение – неизменяемым в осевом направлении.

Сопоставление экспериментальных данных по эффективности гидродинамической очистки, полученных в работе [2], и результатов расчета устойчивости, приведенных в [5], показывают, что ограниченный рост и максимум эффективности имеют место при режимах, которые находятся в области неустойчивости течения в зоне отделения примесей. В то же время несколько режимов, характеризующихся относительно невысокой угловой скоростью фильтроэлемента и низкой степенью проявления гидродинамического эффекта очистки, наоборот, попадают в зону устойчивости.

Такое положение вещей в первую очередь заставляет искать аспекты, неучтенные при использованной постановке задачи об устойчивости течения. Среди таких аспектов обращает на себя внимание тот факт, что конструкция сетчатого фильтрующего элемента, строго говоря, не обеспечивает выполнение условий, соответствующих допущениям, принятым в упомянутых исследованиях с позиций линейной теории гидродинамической устойчивости.

Для правильного выбора путей повышения эффективности гидродинамической очистки полнопоточными ротационными фильтрами необходимо оценить, насколько учет названного фактора сказывается на оценке границ устойчивости течения в зоне отделения примесей.

Таким образом, **целью настоящей работы** является оценка влияния конструктивных особенностей вращающегося фильтрующего элемента на гидродинамическую устойчивость течения в рабочей полости ротационного фильтра.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Информацию об устойчивости потока и характере ее потери можно получить путем непосредственного решения нестационарных уравнений движения жидкости. Для этого будем рассматривать расчетную схему, представленную на рис. 2.

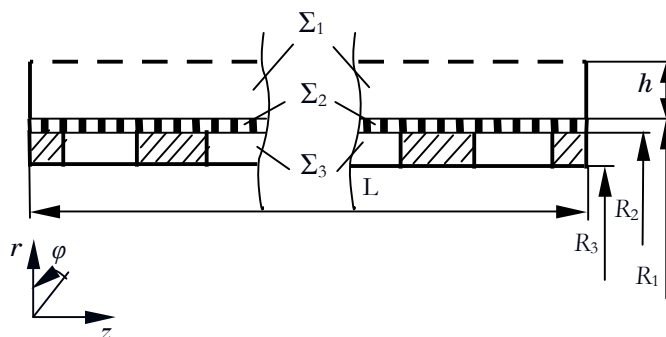


Рисунок 2 – Расчетная схема исследуемой области течения

Нестационарное движение несжимаемой жидкости во вращающейся системе координат описывается следующим векторным уравнением [6]:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla(\rho(\mathbf{V} - \mathbf{V}_e)\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \mathbf{T} - \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}), \quad (1)$$

где $\mathbf{T} = \mu(\nabla\mathbf{V} + (\nabla\mathbf{V})^T)$ – тензор вязких напряжений; ρ, μ – плотность и вязкость жидкости; p – давление; \mathbf{V}, \mathbf{V}_e – векторы абсолютной и переносной скорости; $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор переносной угловой скорости; \mathbf{r} – радиус-вектор во вращающейся системе координат.

Динамическое уравнение (1) дополняется уравнением неразрывности

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (2)$$

Фильтрующую сетку при моделировании будем рассматривать как пористую зону. При этом в области Σ_2 (рис.2) в правую часть уравнения (1) следует добавить в соответствии с законом Дарси источник член следующего вида:

$$-\mu \mathbf{a} \cdot \mathbf{V}, \quad (3)$$

где тензор

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & a_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & a_3^{-1} \end{bmatrix}$$

определяет проницаемость среды в трех независимых направлениях. Скорость в (3) в дальнейшем рассматривается как приведенная, определяемая без учета стеснения проходного сечения. Это обстоятельство необходимо учитывать при задании коэффициентов проницаемости. При таком подходе компоненты действительной скорости определяются делением компонент приведенной скорости на коэффициенты живого сечения в соответствующих направлениях.

Граничные условия определим следующим образом:

$$v_r = -Q/(2\pi(R_1 + h)L), \quad v_\varphi = v_z = 0 \quad (r = R_1 + h);$$

$$v_r = v_\varphi = v_z = 0 \quad (z = 0, z = L, \quad r \in [R_1, R_1 + h]);$$

$$v_\varphi = \Omega r, \quad v_r = v_z = 0 \quad (\text{на участках поверхности фильтроэлемента});$$

$$p = p_0 \quad (r = R_3),$$

здесь Q – секундный объемный расход жидкости.

Течение, рассматриваемое в соответствии с расчетной схемой на рис.1, будем считать осесимметричным.

При дискретизации исходных уравнений для получения численного решения использован метод конечного объема. Основные аспекты его применения изложены в работах [7],[8],[9]. Дадим здесь краткую характеристику основных схемных решений, принятых в рамках конечно-объемного подхода.

Дискретизация конвективного члена выполнена с применением схемы Леонарда (QUICK) [10], обеспечивающей на структурированной сетке

третий порядок точности. Диффузионное слагаемое представлено на основе центрально-разностной аппроксимации, имеющей второй порядок точности. Для представления нестационарного члена использована трехслойная полностью неявная схема второго порядка точности. Взаимосвязанная процедура коррекции давления и скорости в рамках общего подхода, предложенного Патанкармом [7], осуществляется на основе алгоритма PISO [11], обеспечивающего использование существенно больших шагов по времени в нестационарных расчетах.

Решение дискретной системы алгебраических уравнений проводится на основе итерационного метода Зейделя с применением алгебраического многосеточного ускорителя в реализации, основанной на теории аддитивной коррекции (АС- стратегия) [12].

Для верификации полученного численного решения, кроме исследования сходимости по сеткам, проводилось сравнение результатов численного решения с известным классическим решением (см., например, [13]) задачи об устойчивости течения между вращающимися внутренним и неподвижным наружным соосными цилиндрами. Такую задачу можно рассматривать как упрощенный частный случай представляющей для нас интерес более общей проблемы. На рис. 3 представлены результаты численного расчета в виде картин линий тока для трех значений угловой скорости внутреннего цилиндра, близких к значению Ω^* , которое определено аналитически [13] и соответствует потере устойчивости вращательным течением Куэтта.

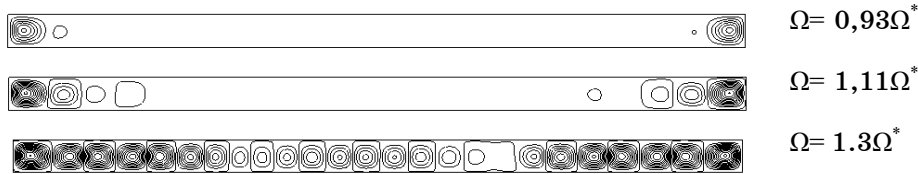


Рисунок 2 – Линии тока в кольцевой области между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами

Результаты численного расчета с учетом наличия торцевых эффектов хорошо согласуются с известным результатом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуя влияние на устойчивость течения жидкости особенностей каркаса фильтроэлемента, рассмотрим две конструктивные схемы, представленные на рис. 4.

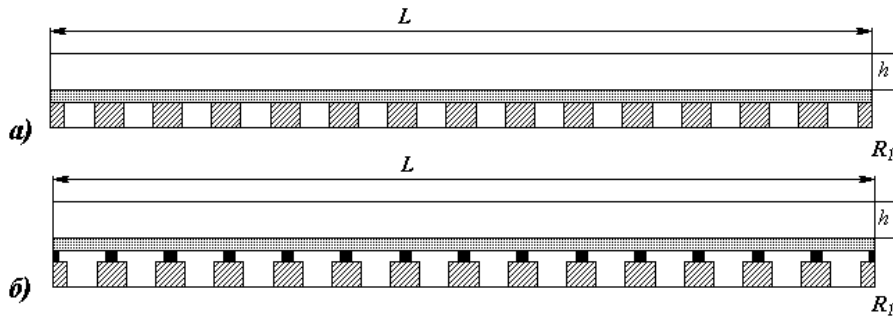


Рисунок 4 – Рассматриваемые варианты конструкции фильтроэлемента

Первая из них (рис. 4а) соответствует варианту конструкции, когда фильтрующая сетка натянута непосредственно на поверхность каркаса. Вторая (рис. 4б) отличается тем, что фильтрующая сетка (вместе с подложкой) приподнята над каркасом с помощью проставок (например, проволочных колец).

Для расчетов выбраны следующие размеры области : $R_1 = 10h$, $L = 21h$. Толщина фильтрующей перегородки $\delta = 0,3h$. Проницаемость перегородки в радиальном направлении $a_1 = 0,11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$. Коэффициент живого сечения фильтроэлемента (отношение площади поверхности, расположенной над проницаемыми участками каркаса, к площади всей поверхности) равен $\alpha_a = 0,5$ для варианта на рис.4а и $\alpha_b = 0,815$ для варианта на рис.4б. Высота проставок во втором случае равна толщине фильтрующей перегородки. Обсуждаемые ниже результаты получены для значения характерного размера $h = 0,005 \text{ м}$.

На рис. 5 представлены нейтральные кривые устойчивости для двух рассматриваемых вариантов конструкции фильтроэлемента в сравнении с аналогичной кривой, построенной методами линейной теории гидродинамической устойчивости [5] для случая, который можно характеризовать как отсутствие каркаса при равномерном распределении скорости отсоса по всей фильтрующей поверхности. Кривые представлены в осях Re , k_v , где число Рейнольдса определяется по окружной скорости поверхности фильтроэлемента и высоте кольцевого зазора $Re = \rho \Omega R_1 h / \mu$, а параметр $k_v = Q / (2\pi R_1^2 L \alpha \Omega)$ представляет собой отношение среднефильтрационной скорости к окружной скорости поверхности фильтроэлемента. Области устойчивости располагаются над соответствующими кривыми.

С точки зрения эффективности гидродинамической очистки устойчивость течения для нас означает в первую очередь отсутствие возмущений вихревого характера вблизи участков поверхности, через которые осуществляется фильтрование. Здесь речь идет об участках сетки, либо расположенных над отверстиями в каркасе фильтроэлемента, либо приподнятых над каркасом с помощью проставок. Как видно из рис. 6а, при сохранении невозмущенного характера течения над этими участками, над нерабочими участками поверхности фильтроэлемента могут иметь место локализованные вихри. С учетом этого обстоятельства при построении нейтральных кривых на рис. 5 к устойчивым относились и такие режимы, при которых стационарные вихри над нерабочими участками не искажали течение в зонах фильтрования. Подобная ситуация в существенно меньшей степени относится к конструкции фильтроэлемента на рис. 4б в силу значительно меньшей площади нерабочих участков фильтрующей поверхности (см. рис. 6б).

Сопоставление нейтральных кривых на рис. 5 показывает, что во всех случаях наличие нерабочих участков поверхности фильтроэлемента снижает запас устойчивости течения в исследуемой области в том смысле, что стабилизация при прочих равных условиях имеет место при больших значениях скорости фильтрования, что, в свою очередь, снижает эффект гидродинамической очистки. Последний можно оценить отношением радиальной скорости жидкости к окружной вблизи фильтрующей поверхности на характерном расстоянии от нее. Таким характерным расстоянием является размер частиц, очистка от которых подразумевается. Будем называть это отношение, определяемое следующим образом:

$$\eta^* = \left(\frac{v}{w} \right)_{r=R_1+d_p}, \quad (4)$$

условным коэффициентом эффективности гидродинамической очистки. Условность здесь выражается в том, что вместо составляющих скорости частицы вблизи фильтрующей поверхности мы рассматриваем составляющие скорости несущей жидкости.

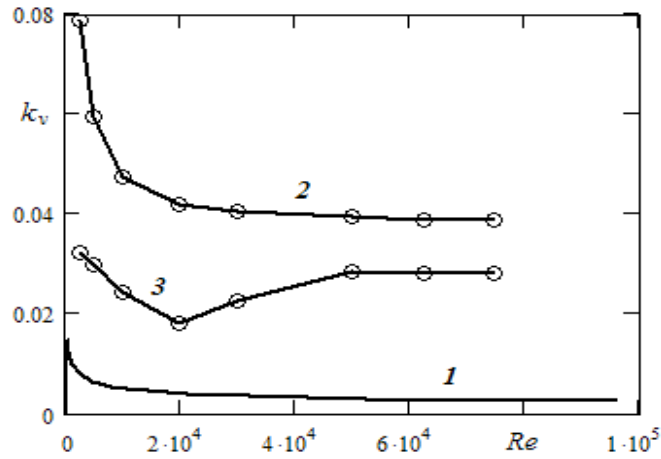


Рисунок 5 – Границы устойчивости течения снаружи вращающегося фильтроэлемента: 1- равномерная фильтрация по всей поверхности фильтроэлемента [5];
2 – конструкция на рис. 4а; 3- конструкция на рис. 4б

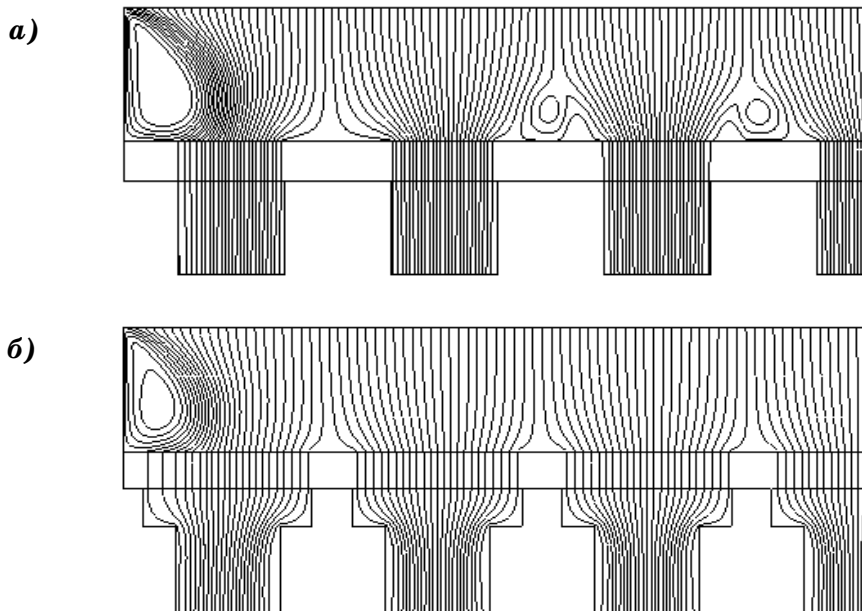


Рисунок 6 – Фрагменты картины линий тока для двух вариантов конструкции фильтроэлемента: а) сетка натянута на каркас; б) сетка приподнята над каркасом на проставках

На рис.7 для двух рассматриваемых вариантов конструкции фильтроэлемента представлены графики изменения коэффициента η^* вдоль образующей фильтроэлемента. Размер d_p в (4) принят равным $0,02h$. Оба графика соответствуют угловой скорости $\Omega = 200 \text{ с}^{-1}$ ($Re \approx 50000$) и критическому режиму, характеризующемуся минимальным запасом устойчивости.

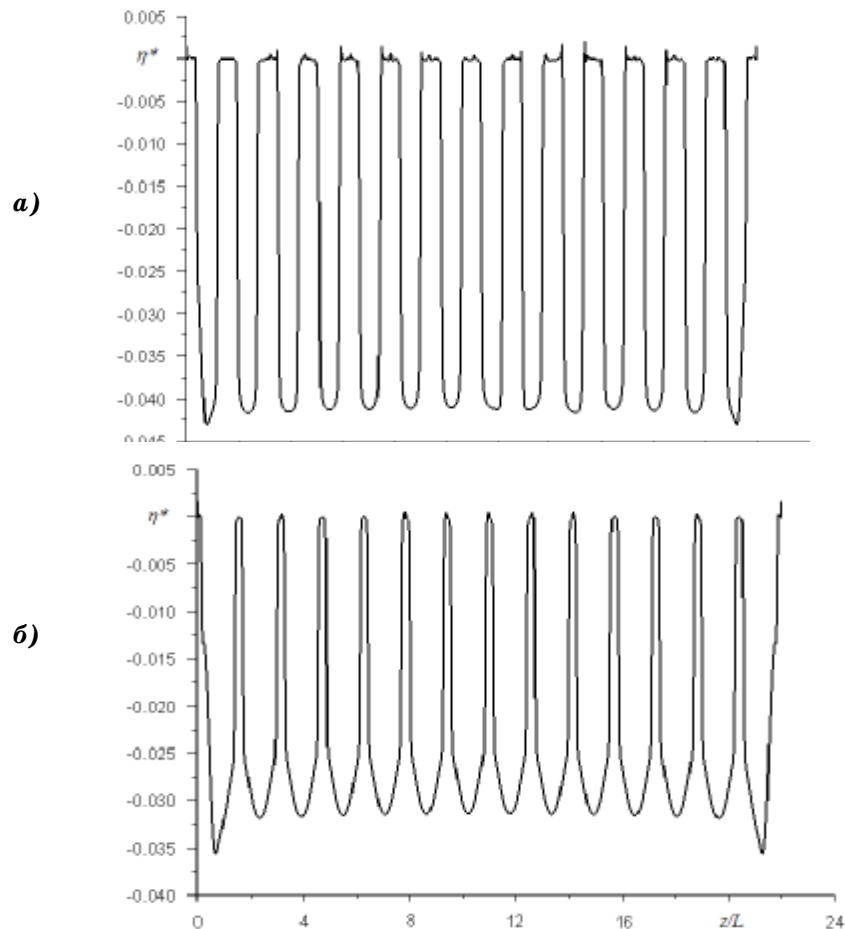


Рисунок 7 – Изменение параметра η^* вдоль образующей фильтроэлемента:
 а) сетка натянута на каркас; б) сетка приподнята над каркасом

Наибольшие по модулю отрицательные значения коэффициента η^* соответствуют локально наихудшим условиям для проявления гидродинамического эффекта и соответственно характеризуют в целом эффективность гидродинамической очистки. Как видно из рис.7, конструкция фильтроэлемента с приподнятой сеткой обеспечивает некоторое (порядка 25%) повышение эффективности гидродинамической очистки по сравнению с альтернативной конструкцией. При меньших угловых скоростях это повышение еще более значительно. Этот вывод следует из сравнения кривых 2,3 на рис.5. В случае относительно невысоких угловых скоростей фильтроэлемента для стабилизации

течения при использовании конструкции с приподнятой сеткой требуется скорость фильтрования в 2 с лишним раза меньшая, чем для альтернативного варианта. Однако, начиная с $Re \sim 20000$, этот запас устойчивости снижается. Данный факт можно объяснить, рассматривая течение в отверстиях каркаса фильтроэлемента. Как видно из рис. 6б, в случае приподнятой над каркасом сетки при входе жидкости в отверстия имеет место поджатие линий тока с отрывом потока от стенок. С повышением угловой скорости вращения во всех случаях для стабилизации течения требуется повышение расхода жидкости через отверстия в каркасе. При этом увеличиваются размеры отрывных зон, в которых имеет место циркуляционное течение с образованием вихрей. В таких условиях раньше возникают обратные токи через выходное сечение со стороны внутренней поверхности каркаса. Последние носят нестационарный характер и служат источником возмущений, которые и приводят к более ранней потере устойчивости в интересующей нас области.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают, что наличие нерабочих участков поверхности в конструкциях фильтроэлемента приводит к заметному снижению запаса устойчивости течения в зоне отделения примесей ротационного фильтра. Это выражается в том, что для стабилизации течения при каждом фиксированном значении угловой скорости вращения фильтроэлемента требуется большее значение скорости фильтрования, чем то, которое дает расчет, выполненный на основе линейной теории гидродинамической устойчивости для случая равномерного распределения скорости отсоса жидкости по всей фильтрующей поверхности. Для конструкции фильтроэлемента, когда фильтровальная сетка обтягивает его каркас, это увеличение скорости фильтрования составляет в среднем 11,3 раза: от 10 при относительно невысоких угловых скоростях до 14 при высоких. Указанные цифры соответствуют варианту сопоставления, при котором общая площадь поверхности фильтроэлемента считается постоянной. Если проводить сравнение при условии постоянства площади рабочей (проходной для жидкости) поверхности фильтроэлемента, то эти цифры уменьшатся вдвое (при принятом в расчетах коэффициенте живого сечения каркаса для этого варианта $\alpha = 0,5$). При этом вдвое увеличивается и длина фильтроэлемента.

Использование конструкции фильтроэлемента с приподнятой над каркасом сеткой позволяет при прочих равных условиях несколько уменьшить требуемую для обеспечения устойчивости течения скорость фильтрования, что, в свою очередь, повышает эффективность гидродинамической очистки. Это преимущество в большей степени проявляется при умеренных угловых скоростях вращения фильтроэлемента. В частности, отношение предельных скоростей фильтрования для обоих сравниваемых вариантов изменяется с ростом угловой скорости от 2,4 до 1,4.

Следует отметить, что приемлемую для практических целей оценку критической, с точки зрения устойчивости, скорости фильтрования можно получить на основе результатов, полученных методами линейной теории гидродинамической устойчивости для случая полностью проницаемой поверхности фильтроэлемента. При этом необходимо введение поправочного коэффициента, который можно назвать коэффициентом запаса устойчивости, для каждой конструкции фильтроэлемента.

Первоочередными задачами дальнейших исследований в данном направлении являются уточнение полученных количественных

результатов для других значений отношения характерных размеров исследуемой области течения и оценка влияния проницаемости фильтрующей перегородки.

SUMMARY

The numerical simulation of transient liquid flow in admixtures separation zone of rotary filters is accomplished. The fact that the presence of inactive portions of surface in practical structures of rotating filter elements leads to significant decrease in flow stability factor is shown. Comparative analysis of two embodiments of filter element design from standpoint of flow stabilization and effectiveness of hydrodynamic cleaning of liquids with rotary filter is performed.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. — М.: Недра, 1986. — 232 с.
2. Мочалин Е.В., Петренко А.В., Кривошея П.Н., Иванова Е.О. Исследование эффективности тонкой очистки жидкостей ротационными фильтрами // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск: ДонГТУ, 2006. - Вып. 20.- С. 292-304.
3. Мочалин Е.В. К вопросу компьютерного моделирования устойчивости стационарных состояний систем с распределенными параметрами // Сборник научных трудов. - Алчевск: ДГМИ, 2001.- Вып.14.- С. 333-340.
4. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Численный анализ устойчивости осесимметричных течений жидкости на основе метода конечных элементов // Вісник Східноукраїнського національного університету.- 2005. - №10(92).- С.149-156.
5. Мочалин Е.В. Гидродинамическая устойчивость в рабочей полости ротационного фильтра // Промислова гідроліка і пневматика.- 2005.-№4(10).- С. 50-54.
6. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости.- М.: Мир, 1973.- 758с.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 152с.
8. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics.- Berlin, Heidelberg, 1999.- 389p.
9. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев.- СПб.: Судостроение, 2005.- 392с.
10. Leonard B.P. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation// Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 1979.-Vol.19, №1.-P.59-98.
11. R.J. Issa Solution of Implicitly Discretized Fluid flow Equations by Operator Splitting // J. Comput. Phys. - 1986. - №62. - P.40-65.
12. Hatchinson B.R., Raithby G.D. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy// Numerical Heat Transfer? - 1986.-№9. -P.511-537.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.

Поступила в редакцию 20 декабря 2006 г.