

Границы устойчивости течения в гидродинамическом фильтре

В.А. Девисилов, доцент, канд. техн. наук

Е.Ю. Шарай, ассистент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: devisilov@bmstu.ru, e9.sharay@yandex.ru

Ключевые слова:

устойчивость течения, вращающийся цилиндр, гидродинамический фильтр, математическое моделирование, вихри Тейлора.

Рассмотрено явление потери ламинарной устойчивости течения жидкости в рабочей зоне гидродинамического фильтра с образованием тороидальных вихрей. Представлены расчетные результаты численного моделирования стационарного течения жидкости в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами при различных граничных условиях. Показано, что наличие отсоса жидкости с поверхности вращающегося внутреннего цилиндра приводит к стабилизации и увеличению запаса устойчивости течения в гидродинамических фильтрах. Определены границы устойчивости течения в зависимости от числа Тейлора, угловой скорости вращающегося цилиндра и скорости отсоса жидкости через его поверхность.

1. Введение

Для очистки жидкости от механических загрязнений в промышленности применяются гидродинамические фильтры, одной из разновидностей которых является гидродинамический вибрационный фильтр [1–2]. Принцип действия гидродинамического вибрационного фильтра основан на пропускании жидкости через кольцевой канал, образованный неподвижным цилиндрическим корпусом и вращающейся внутренней фильтровальной перегородкой, совершающей колебания вдоль оси вращения (рис. 1). Вращающаяся фильтровальная перегородка закручивает поток, тем самым обеспечивается центробежная сепарация частиц, снижается нагрузка на фильтровальный материал и увеличивается ресурс работы фильтра. При этом около 7–15% очищаемой жидкости перепускается вдоль фильтровальной перегородки. Благодаря наличию вибрации и продольной составляющей скорости, возникающей при перепуске части потока, гидродинамический вибрационный фильтр обладает возможностью саморегенерации, заключающейся в разрушении слоя осадка и непрерывном его удалении с поверхности фильтровальной перегородки. Исследованию гидродинамического фильтрования посвящено большое количество работ [1–7], однако в настоящее время остается актуальной задача определить границы

применимости данного метода очистки жидкости от твердых частиц, в которых сохраняется устойчивость течения. Определение границ устойчивости течения экономически и технологически значимая задача, так как потеря устойчивости приводит к снижению эффективности очистки [7].

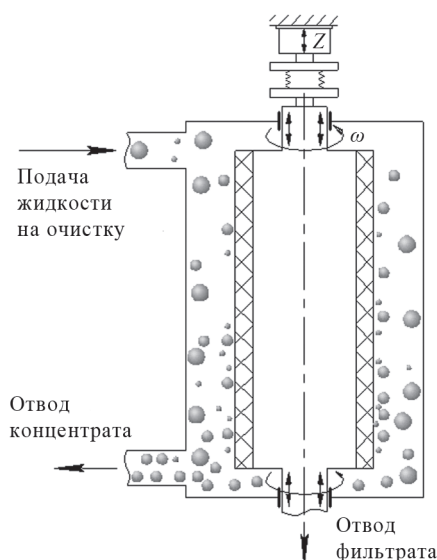


Рис. 1. Схема гидродинамического вибрационного фильтра

2. Состояние вопроса и постановка задачи

Картина течения среды в гидродинамическом вибрационном фильтре достаточно сложная, поэтому целесообразно рассмотреть последовательно отдельные составляющие процесса, обусловленные действием основных силовых факторов. Для исследования устойчивости стационарного движения вязкой жидкости удобно выделить течение в кольцевой области фильтра, образованной неподвижным цилиндрическим корпусом и вращающейся цилиндрической фильтровальной перегородкой. Это течение представляет собой частный случай известного течения между двумя коаксиальными цилиндрами с неподвижным наружным и вращающимся внутренним [8]. Известно, что при такого рода течении может возникать неустойчивое расслоение жидкости, поскольку частицы жидкости, находящиеся вблизи вращающегося цилиндра, стремятся переместиться к наружному [9]. При этом, начиная с определенного числа Рейнольдса, между цилиндрами возникают правильно чередующиеся тороидальные вихри с правым и левым вращением [10], получившие название вихрей Тейлора. Условие возникновения вихрей определяется числом Тейлора Ta [9]:

$$Ta = Re \sqrt{\frac{h}{R}} = \frac{uh}{\nu} \sqrt{\frac{h}{R}} \geq 41,3, \quad (1)$$

где Re — число Рейнольдса; u — окружная скорость внутреннего цилиндра, м/с; h — ширина промежутка между цилиндрами, м; ν — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; R — радиус внутреннего цилиндра, м. Область при числе Тейлора $Ta < 41,3$ характеризуется ламинарным течением Куэтта, имеющим точное аналитическое решение [11].

Однако выражение (1) не является условием устойчивости течения в гидродинамическом фильтре, так как присутствуют факторы, оказывающие стабилизирующее влияние. В рассматриваемом реальном течении к таким факторам относятся вязкость и отсасывание части жидкости через пористую перегородку [12, 13]. При фильтровании высоковязких сред потеря ламинарной устойчивости произойдет при большей частоте вращения, а также при уменьшении толщины пограничного слоя за счет отсоса части жидкости через вращающийся цилиндр. Поэтому для правильного подбора режимных параметров фильтра необходимо знать границы потери устойчивости с учетом указанных стабилизирующих факторов.

В [14, 15] определена граница центробежной потери устойчивости потоком снаружи вращающегося цилиндра с отсосом жидкости через его поверхность

для случая, когда окружное движение под влиянием отсоса сосредоточено в тонком слое у поверхности вращающегося цилиндра и влияние внешнего цилиндра на стационарное течение не проявляется, т. е. при радиальном числе Рейнольдса

$$Re_r = v_0 R / \nu > 50, \quad (2)$$

где v_0 — скорость отсоса, м/с; R — радиус внутреннего цилиндра, м; ν — кинематическая вязкость жидкости, м²/с. Однако при очистке высоковязких жидкостей (отработанные масла, растворы полимеров, буровые промывочные растворы) в гидродинамическом фильтре условие (2) не выполняется, следовательно, граница потери устойчивости будет смещена. Таким образом, задача данного исследования состоит в оценке границ возникновения тороидальных вихрей между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами.

3. Метод исследования

Решение поставленной задачи реализовано с помощью математического моделирования в программном комплексе ANSYS CFX путем решения уравнений движения жидкости и неразрывности методом конечных объемов. Расчетная модель (рис. 2) представляет собой кольцевой канал, образованный двумя коаксиальными цилиндрами. Внутренний цилиндр имеет радиус $R = 1$, внешний — $R_2 = 1,75$. Рассматривается течение между бесконечными цилиндрами, заданное условием периодичности на длине $L = 5$, которая позволяет получить трехмерные неустойчивости, орга-

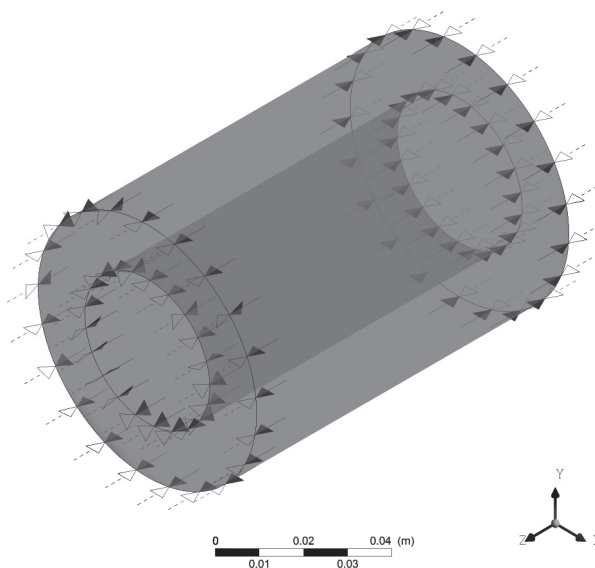


Рис. 2. Расчетная модель

низующиеся в течение с вихрями Тейлора [16]. Расчет выполнялся при следующих условиях.

- Наружный цилиндр неподвижен, внутренний непроницаемый цилиндр вращается с угловой скоростью ω , окружное число Рейнольдса

$$Re_\phi = \frac{\omega R(R_2 - R)}{\nu}$$

изменялось в диапазоне от 4

до 450.

- Наружный цилиндр неподвижен, внутренний проницаемый цилиндр вращается с угловой скоростью ω ; через поверхность внутреннего цилиндра происходит отсос части жидкости. Окружное

число Рейнольдса $Re_\phi = \frac{\omega R(R_2 - R)}{\nu}$ изменялось в

диапазоне от 4 до 450, радиальное число Рейнольдса Re_r (2) варьировалось от 0,15 до 500.

При расчете варьировались следующие параметры: угловая скорость ω ; кинематическая вязкость жидкости ν ; скорость отсоса v_0 .

3. Основные результаты

Наружный цилиндр неподвижен, внутренний непроницаемый цилиндр вращается с угловой скоростью ω .

Определена граница потери центробежной устойчивости в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами при неподвижном наружном и вращающемся внутреннем. Граница появления макровихревых структур в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра показана на рис. 3. Область устойчивости, подразумевающая отсутствие вихревых возмущений, расположена слева от линии 4, область наличия вихрей, соответственно, справа. Установлено, что условие возникновения вихрей Тейлора (1) выполняется для маловязких сред с кинематической вязкостью, сравнимой с вязкостью воды (рис. 3, маркеры 3). При более вязких средах (масло, растворы глицерина) вихри возникают при большем значении числа Тейлора Ta (рис. 3, маркеры 1, 2). Сравнение показывает, что для среды с вязкостью $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 3, маркеры 1) имеет место увеличение критического числа Ta более чем в 2 раза по сравнению с результатом (1). Таким образом, подтвержден вывод о том, что вязкость среды оказывает стабилизирующее действие на устойчивость течения между двумя цилиндрами [11]. В исследуемом диапазоне кривая устойчивости хорошо аппроксимируется выражением с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$:

$$\omega = 10^{-17} Ta^{9,438}.$$

Получена картина течения вязкой среды при отсутствии отсоса через внутренний вращающийся

ω , рад/с

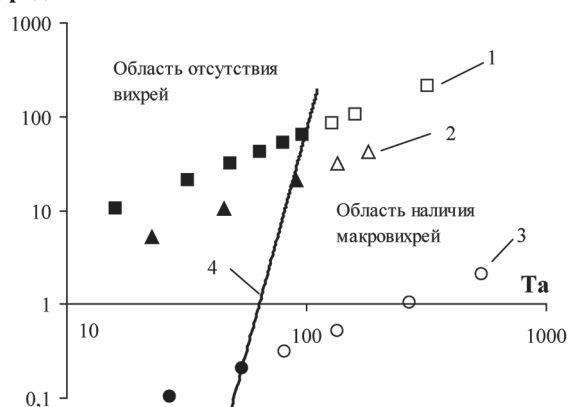


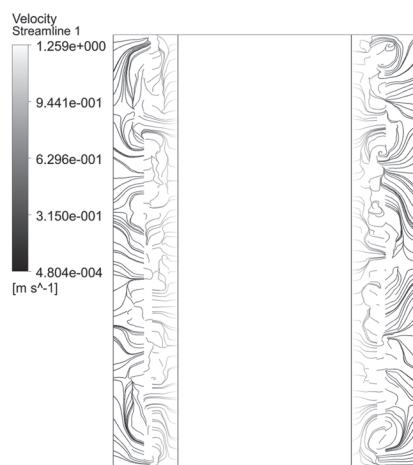
Рис. 3. Граница появления макровихревых структур в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра: численный расчет при 1 – $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $\nu = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 4 – граница устойчивости

цилиндр. На рис. 4 представлены результаты численного расчета в виде картины линий тока в проекции на плоскость меридионального сечения цилиндров для различных значений числа Тейлора, иллюстрирующих этапы формирования вихревого течения для жидкостей с вязкостью $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 4 а–в) и $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 4 г–е).

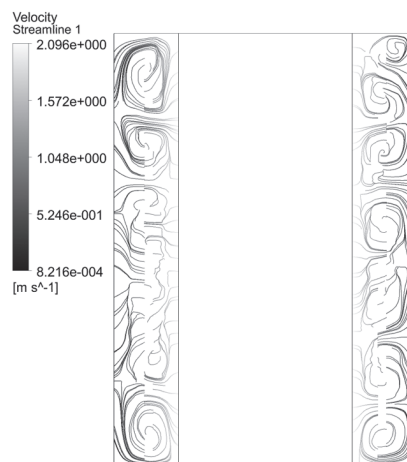
С точки зрения эффективности гидродинамической очистки устойчивость течения означает отсутствие вихрей во всем диапазоне режимных параметров, рекомендованных в зависимости от дисперсного состава загрязнений и реологических свойств дисперсионной среды [2]. Численное моделирование показало, что, хотя вязкость оказывает стабилизирующее действие на течение среды между двумя цилиндрами, этого фактора не достаточно для того, чтобы говорить об устойчивости течения во всем диапазоне режимных параметров работы гидродинамического фильтра, используемого для очистки от механических загрязнений. Поэтому необходимо рассмотреть течение среды при отсосе части жидкости через внутренний вращающийся цилиндр, реализуемое в гидродинамическом фильтре. Это второй фактор стабилизации течения.

Отсос части жидкости через внутренний вращающийся цилиндр.

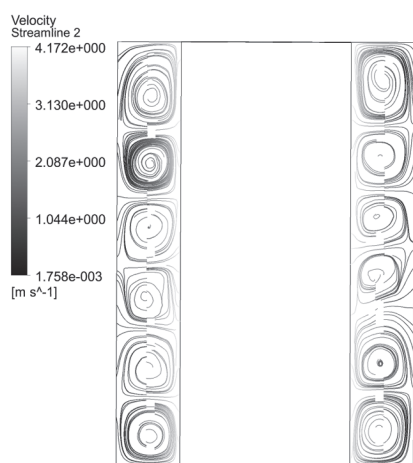
В гидродинамическом фильтре 85–93% всего объема жидкости, поданной в аппарат для очистки, пропускается через фильтровальную перегородку. Таким образом, через внутренний вращающийся цилиндр происходит отсос части потока. При задании граничных условий на внутреннем цилиндре введены следующие допущения: скорость отсоса равна скорости фильтрации; скорость отсоса одинакова по



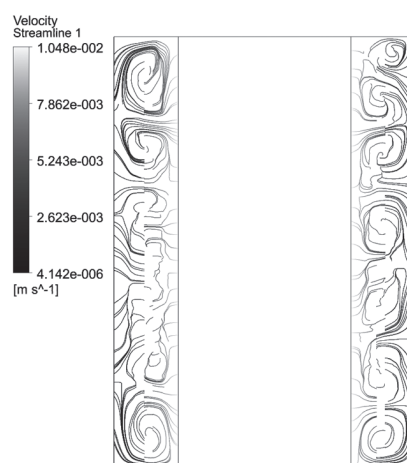
а



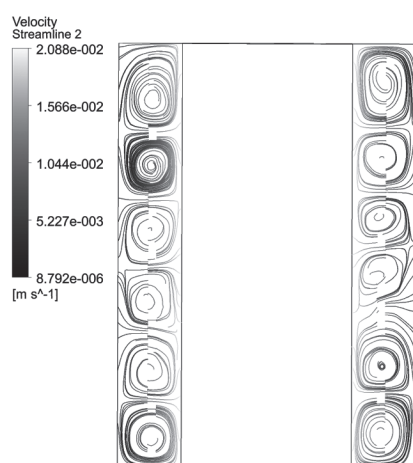
б



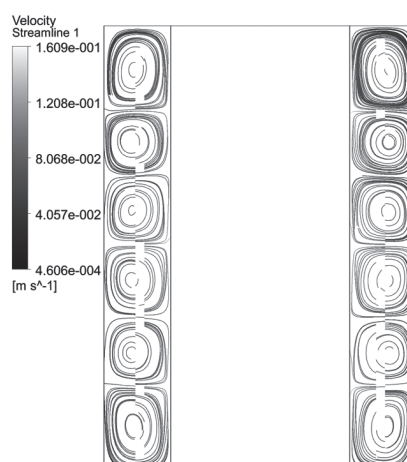
в



г



д



е

Рис. 4. Линии тока в кольцевой области между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами при:
а) $Ta = 96$, $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; б) $Ta = 159$, $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; в) $Ta = 320$, $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; г) $Ta = 134$, $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; д) $Ta = 270$,
 $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; е) $Ta = 21496$, $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

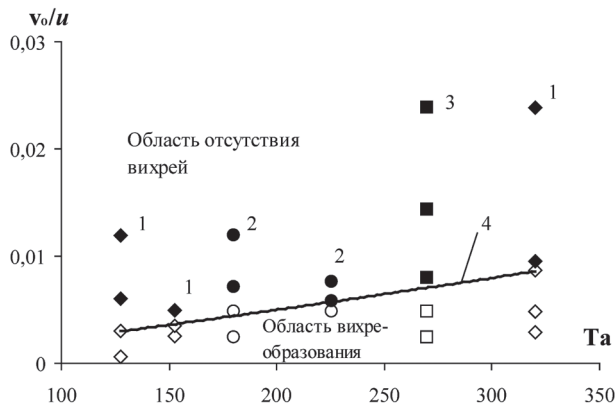


Рис. 5. Граница появления макровихревых структур в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра: численный расчет при 1) $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2) $\nu = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; 3) $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 4) граница устойчивости

всей длине цилиндра. Численным моделированием определялась структура потока в зазоре между двумя цилиндрами при различных соотношениях скорости отсоса v_0 и окружной скорости u внутреннего цилиндра, на основании чего определялась граница появления вихрей Тейлора. Граница появления макровихревых структур в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра при наличии отсоса через внутренний цилиндр показана на рис. 5.

Область устойчивого течения, характеризующегося отсутствием вихрей и спиральными линиями тока, расположена выше линии 4 на рис. 5, область вихреобразования — ниже линии 4. Граница устойчивости аппроксимируется зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$:

$$v_0 / u = 10^{-5} Ta^{1,153}.$$

Как можно видеть, в исследуемом диапазоне отношений v_0/u , характерных для рабочих режимов гидродинамического фильтра, кривая границы потери устойчивости возрастает с увеличением числа Тейлора.

Проведенный расчет показал, что отсос жидкости через вращающийся цилиндр, как и вязкость среды, оказывает стабилизирующее действие на течение между двумя цилиндрами. Наличие этих двух факторов достаточно для того, чтобы говорить об устойчивости течения во всем диапазоне режимных параметров работы гидродинамического фильтра, рекомендованных для очистки от механических загрязнений высоковязких сред. Для маловязких жидкостей, реологические характеристики которых сравнимы с характеристиками воды, при исследованных режимных параметрах в кольцевой области



Рис. 6. Влияние отсоса жидкости через внутренний вращающийся цилиндр на изменение границы устойчивости течения: 1) граница устойчивости при $v_0 = 0$; 2) граница устойчивости при отсосе среды через внутренний цилиндр

возникает вихревое течение, поэтому для таких сред стабилизирующего действия отсоса части потока недостаточно. На рис. 6 показано влияние отсоса через внутренний вращающийся цилиндр на изменение кривой устойчивости для среды с кинематической вязкостью $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Линия 1 на рис. 6 является границей устойчивости при отсутствии отсоса через вращающийся внутренний цилиндр, которая определяется критической окружной скоростью $u_{кр}$ для среды с вязкостью $\nu = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и соответствующих размеров цилиндров. Область, расположенная справа от штриховой линии 1, является зоной вихреобразования при отсутствии отсоса. При наличии отсоса граница устойчивости будет определяться соотношением окружной скорости вращения цилиндра и скоростью отсоса. Кривая 2 на рис. 6 характеризует границу устойчивости при наличии отсоса. Таким образом, отсос через вращающийся цилиндр является стабилизирующим фактором, увеличивающим зону устойчивого течения. Следовательно, появляется возможность повысить эффективность работы гидродинамического фильтра за счет расширения границы режимных параметров, подбирая оптимальное соотношение окружной скорости вращения и скорости отсоса, исключающее образование вихрей.

Получена картина течения вязкой среды в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами при наличии отсоса через внутренний вращающийся цилиндр. На рис. 7 представлены результаты численного расчета в виде картины линий тока в проекции на плоскость меридионального сечения цилиндров (рис. 7 а–в) и во всем объеме расчетной области (рис. 7 г) для различных соотношений скорости v_0/u и значения числа Тейлора $Ta = 320$. Анализ

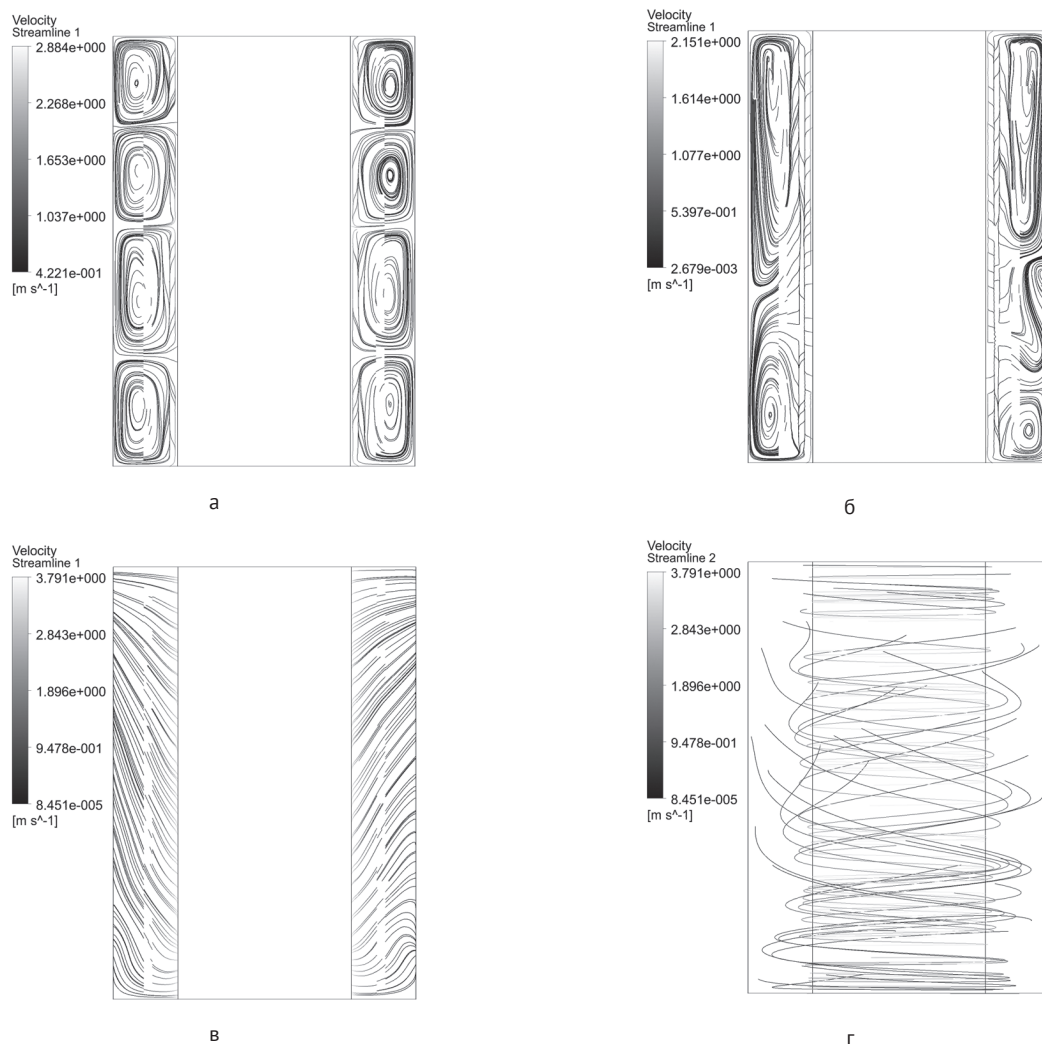


Рис. 7. Линии тока в кольцевой области между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами с отсосом через внутреннюю поверхность при $Ta = 320$: а) $v_o/u = 2,9 \cdot 10^{-3}$; б) $v_o/u = 4,8 \cdot 10^{-3}$; в, г) $v_o/u = 2,4 \cdot 10^{-3}$

структуры потоков в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами показал, что вторичные течения по типу вихрей Тейлора проявляются по всей ширине кольцевой области. На рис. 7 а и б показаны этапы развития вихревого течения — с увеличением скорости вращения и уменьшением скорости отсоса интенсивность вторичных течений возрастает, вихревые структуры занимают все большую часть кольцевой области между цилиндрами. На рис. 7 в и г показано устойчивое спиральное течение при числе Тейлора $Ta = 320$ и отношении скорости отсоса к окружной скорости вращения внутреннего цилиндра $v_o/u = 2,4 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, хотя с увеличением угловой скорости вращения возрастает действие центробежной силы на сепарацию частиц, при гидродинамическом фильтровании режимные параметры имеют предел, определяемый условием возникновения вихрей.

Для проверки достоверности полученных результатов исследована сходимость расчетов по сеткам, а также полученные решения сравнивали с известными классическими решениями по профилю скорости в кольцевой области между двумя цилиндрами. Расхождение в результатах составило не более 1,5%, что говорит об адекватности численных решений.

4. Выводы

Представлены результаты численного моделирования течений вязкой жидкости между вращающимися цилиндрами в трехмерной постановке. При выполнении расчетов определена граница потери центробежной устойчивости в кольцевой области между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами при наличии и отсутствии отсоса через внутреннюю поверхность последнего. Численным моделированием подтверждено, что

вязкость среды и наличие отсоса через внутренний цилиндр являются стабилизирующими факторами устойчивости течения. Показано, что повышения эффективности работы гидродинамического фильтра можно добиться за счет выбора режимов работы фильтра, исключающих образование макровихревых структур в кольцевой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамические вибрационные фильтры для регенерации отработанных масел и нефтепродуктов // Экология и промышленность России. — 2005. — Июль. — С. 4–7.
2. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Гидродинамика течения реологической сложной жидкости в гидродинамическом фильтре // Теоретические основы химической технологии. — 2012. — Т. 46, № 6. — С. 631–638.
3. Финкельштейн З. Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. — М.: Недра, 1986. — 233 с.
4. Галко С.А., Улюкина Е.А. Гидродинамические фильтры-водоотделители для очистки нефтепродуктов // Международный технико-экономический журнал. — 2011. — №2. — С. 111–115.
5. Валиулин С.С. Моделирование гидродинамических процессов в циклонной части фильтра-сепаратора // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — №3. — С. 72–77.
6. Wereley S.T., Lueptow R.M. Inertial particle motion in a Taylor Couette rotating filter // Phys. Fluids. — V. 11. — Issue 2. — P. 325–334.
7. Мочалин Е.В. Устойчивость течения жидкости снаружи вращающегося сетчатого фильтроэлемента // Вестник Сумского государственного университета. — 2006. — № 12 (96). — С. 23–32.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974. — 712 с.
10. Taylor G.I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders // Phil.Trans. A. 223. — 1923. — P. 289–293.
11. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидродинамика. Ч.2. — М.: Физматгиз, 1963. — 728 с.
12. Cotrell D.L., Pearlstein A.J. Linear stability of spiral and annular Poiseuille flow for small radius ratio // J. Fluid Mech. 2006. V. 547. P. 1–20.
13. Takeuchi D.I., Jankowski D.F. A numerical and experimental investigation of the stability of spiral Poiseuille flow // J. Fluid Mech. 1981. V. 102. P. 101–126.
14. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Особенности проявления центробежной неустойчивости снаружи вращающегося цилиндра при протокe жидкости через его поверхность // Вестник национального технического университета «ХПИ». — 2010. — № 57. — С. 108–113.
15. Мочалин Е.В. Особенности проявления центробежной неустойчивости вблизи вращающегося пронцаемого цилиндра // Вісник СНУ ім. В.Даля. — 2011. — № 5 (159). Ч. I. — С. 310–316.
16. Максимов Ф.А., Шевелев Ю.Д. Условие периодичности при моделировании течения между вращающимися цилиндрами // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках/ Тезисы докладов XIX Школы-семинара молодых ученых и специалистов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — С. 66–67.

Current Stability Limits in Hydrodynamic Filter

V.A. Devisilov, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University
E.Yu. Sharay, Assistant, Bauman Moscow State Technical University

The phenomenon related to a loss of laminar stability of fluid flow in hydrodynamic filter's working zone with formation of toroidal vortexes is considered. Estimated results related to numerical modeling of liquid's stationary current in a gap between two coaxial cylinders are presented under various boundary conditions. It is shown that existence of liquid suction from rotating internal cylinder surface leads to stabilization and increase of flow's stability margin in hydrodynamic filters. The flow stability limits depending on Taylor's number, rotating cylinder's angular velocity and liquid suction speed through the cylinder's surface are defined.

Keywords: flow stability, rotating cylinder, hydrodynamic filter, mathematical modeling, Taylor vortexes.