

Е.В. МОЧАЛИН, докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,
Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск
И.Г. МОЧАЛИНА, ст. препод., Донбасский государственный
технический университет, г. Алчевск

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СНАРУЖИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА ПРИ ПРОТОКЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ

Получены новые данные о границе возникновения и характере проявления центробежной неустойчивости течения в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра при протекании жидкости через его поверхность. Отмечены особенности развития турбулентности в пограничном слое по окружной скорости на поверхности цилиндра.
Ключевые слова: вращающийся цилиндр, неустойчивость, пограничный слой.

Отримано нові дані про границю виникнення і характер проявлення відцентрової нестійкості течії в кільцевій області зовні обертового циліндра при протіканні рідини крізь його поверхню. Відмічено особливості розвитку турбулентності в примежовому шарі за окружною швидкістю на поверхні циліндра.
Ключові слова: обертовий циліндр, нестійкість, примежовий шар.

New data about appearance bound and development nature of centrifugal instability in annular region outside of rotating cylinder when liquid passing through the surface of the one are obtained. The details of turbulence development in tangential velocity boundary layer on the cylinder surface are observed.
Key words: rotating cylinder, instability, boundary layer.

1. Характеристика проблемы и задачи исследования

В технических приложениях встречается течение снаружи вращающегося проницаемого цилиндра с протоком жидкости через его боковую поверхность. В качестве примера можно привести ротационный фильтр механической очистки жидкостей, в котором сепарация взвешенных частиц осуществляется вращающимся перфорированным цилиндром [1]. Исследование подобного течения представляет интерес и в целях совершенствования энергетических установок с вращающимися цилиндрическими телами.

В монографии [2] систематизированы известные данные по гидродинамике и теплообмену снаружи непроницаемого вращающегося цилиндра при ламинарном и турбулентном движениях жидкости. Там же указано, что отсос жидкости сквозь поверхность цилиндра способен внести существенные изменения в характер течения и границы существования различных режимов движения. Однако достаточно полных результатов, относящихся к этому случаю пока нет.

Достоверно изученным является течение между непроницаемыми соосными вращающимися цилиндрами и его частный случай с неподвижным наружным цилиндром [3,4]. В этом случае первичное ламинарное круговое

течение Куэтта при достаточно малых угловых скоростях сменяется макровихревым движением в виде тороидальных вихрей Тейлора. При дальнейшем увеличении угловой скорости друг друга сменяют целый ряд ламинарных и турбулентных макровихревых режимов. Влияние отсоса жидкости через поверхность вращающегося цилиндра на границы возникновения и характер макровихревого течения требуют своего изучения. Заметим, что для несжимаемой жидкости, различия в постановке задач о напорном протекании через поверхность вращающегося цилиндра и об отсосе жидкости через поверхность отсутствуют. Поэтому для удобства будем в дальнейшем говорить об отсосе жидкости, поскольку с этим понятием устойчиво ассоциируются определенные физические особенности пристеночных течений.

Задача об устойчивом ламинарном течении жидкости, соответствующем рассматриваемому случаю, решена в работе [5]. При этом для распределения окружной скорости снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра получено следующее выражение:

$$v_{\varphi} = \tilde{r}^{1-\text{Re}_r}, \quad (1)$$

где $v_{\varphi} = V_{\varphi}/W$ – безразмерная окружная скорость, $\tilde{r} = r/R$ – безразмерная радиальная координата, R – наружный радиус вращающегося цилиндра, $W = \Omega R$ – окружная скорость поверхности цилиндра, Ω – его угловая скорость, а радиальное число Рейнольдса определяется по скорости отсоса V_o выражением (2).

$$\text{Re}_r = V_o R / \nu \quad (2)$$

Формула (1) справедлива при $\text{Re}_r > 50$, когда окружное движение под влиянием отсоса сосредоточено в тонком слое у поверхности вращающегося цилиндра и влияние внешней стенки на стационарное течение не проявляется. В этом смысле есть основание говорить о пограничном слое на вращающейся поверхности.

Наиболее близким к рассматриваемому типу течением, для которого изучено влияние отсоса жидкости [6,7], является течение в пограничном слое на вогнутой поверхности. Общим является то обстоятельство, что вблизи поверхности вращающегося цилиндра имеет место активное (дестабилизирующее) воздействие центробежных сил, так же как и при обтекании потоком неподвижной вогнутой поверхности. Однако особенностью пограничного слоя на поверхности вращающегося пронцаемого цилиндра является окружная периодичность, что не позволяет автоматически использовать известные результаты.

Таким образом, целью настоящей работы является достоверное определение границы возникновения и характера вторичных течений снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра с отсосом жидкости, а также оценка возможности использования для этого известных результатов.

2. Основные результаты исследования

Физическое подобие закрученных течений определяется [7]

характеристиками вынужденного движения жидкости в каждом из независимых направлений и неравномерности распределения сил инерции. В рассматриваемом случае такими характеристиками являются радиальное (2) и вращательное числа Рейнольдса – $Re_\varphi = WR/\nu$. Вместо Re_r будем в дальнейшем использовать безразмерную скорость отсоса (или параметр отсоса)

$$v_o = V_o/W, \quad (4)$$

учитывая соотношение $Re_r = Re_\varphi v_o$.

В работе [8] с позиций линейной теории гидродинамической устойчивости построены нейтральные кривые, определяющие границу потери устойчивости первичным ламинарным течением снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра с профилем окружной скорости (1) (рис.1). При этом рассматривалась устойчивость по отношению к малым осесимметричным возмущениям.

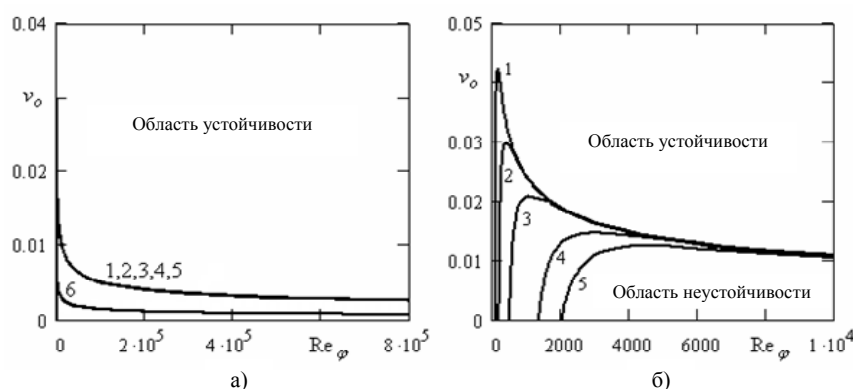


Рис. 1. Нейтральные кривые устойчивости течения в кольцевом зазоре снаружи ВПЦ с отсосом жидкости в диапазонах $Re_\varphi \leq 8 \cdot 10^5$ (а) и $Re_\varphi \leq 1 \cdot 10^4$ (б): 1 – $\tilde{h} = 0.8048$; 2 – $\tilde{h} = 0.4024$; 3 – $\tilde{h} = 0.2012$; 4 – $\tilde{h} = 0.1006$; 5 – $\tilde{h} = 0.0768$; 6 – пограничный слой на вогнутой поверхности с отсосом

Как видно из графиков, при ($Re_\varphi > 10^4$) нейтральная кривая становится универсальной, не зависящей от высоты кольцевой области (h). В этом диапазоне она хорошо аппроксимируется выражением

$$(v_o)_{cr} = 0.26 Re_\varphi^{-0.35} + 3.3 \cdot 10^{-4}. \quad (5)$$

Кривая 6 на рис 1 соответствует формальному применению к рассматриваемому случаю результатов, полученных [6] для пограничного слоя на вогнутой поверхности с отсосом. Сравнение показывает, что в этом случае имеет место занижение более чем на 100% значений критической скорости отсоса по сравнению с более последовательным решением.

Как можно видеть, при $Re_\varphi > 10^4$ критическая скорость отсоса не зависит от высоты кольцевой области. В этом случае $Re_r > 50$ и толщина пограничного слоя в невозмущенном движении меньше высоты h . Линейный анализ дает для длины волны наиболее опасных возмущений (вызывающих при заданном Re_φ потерю устойчивости при наибольших значениях скорости отсоса v_o) значения близкие к удвоенной высоте пограничного слоя ($2\pi/k \approx 2\tilde{\delta}$). При этом сами

возмущения сосредоточены в пределах пограничного слоя. Таким образом, малые осесимметричные возмущения развиваются по типу вихрей Гертлера. Проверку и уточнение этого результата можно выполнить на основе подробного численного моделирования, учитывающего нелинейность исходных уравнений и возможность развития турбулентности.

В работе [9] применительно к течениям в окрестности вращающегося пронизаемого цилиндра обоснован подход к численному решению осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, представленных в виде уравнений переноса компонент импульса во вращающейся цилиндрической системе координат. Верификация и тестирование демонстрируют достоверность и хорошие вычислительные свойства полученного методом конечных объемов приближенного решения.

В [10] показано, что применение SST $k - \omega$ модели турбулентности (модели Ментера) обеспечивает единый расчетный подход к моделированию исследуемого типа течений в широком диапазоне режимов движения жидкости: от устойчивого ламинарного до ламинарных и турбулентных макровихревых движений. При этом обеспечивается адекватный расчет осредненных характеристик течения жидкости, включая возможность предсказания локального вырождения турбулентности в условиях отсоса жидкости через поверхность цилиндра.

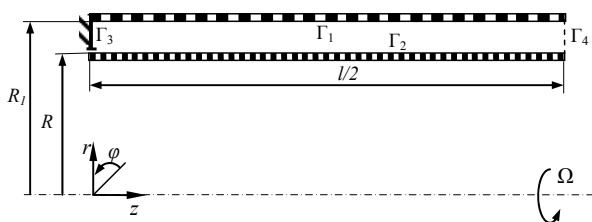


Рис. 2. Расчетная схема течения жидкости в кольцевой области между неподвижным внешним и вращающимся внутренним однородно пронизаемыми цилиндрами

Охарактеризованный подход к подробному численному моделированию обладает высокой общностью и позволяет уточнить представленные выше результаты по устойчивости, полученные в линейном приближении. Для этого будем рассматривать расчетную схему,

представленную на рис. 2 и соответствующую осесимметричной задаче о течении несжимаемой жидкости между неподвижным наружным и вращающимся внутренним пронизаемыми цилиндрами.

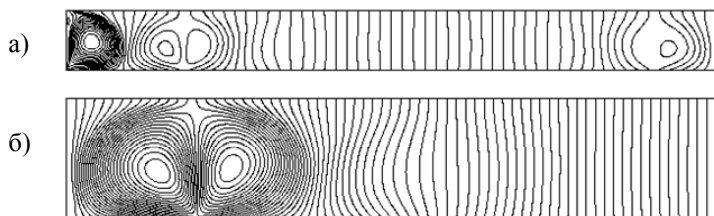


Рис. 3. Линии тока относительного движения жидкости ($Re_\varphi = 2 \cdot 10^5, \nu_o = 0.005$) при $\tilde{h} = 0.1$ (а) и $\tilde{h} = 0.2$ (б)

Из рис. 3 видно, что вторичные течения в виде макровихрей по типу вихрей Тейлора проявляются не в пределах тонкого ламинарного пограничного слоя, как следует из линейного анализа, а по всей высоте кольцевой области.

Эта тенденция сохраняется при увеличении высоты кольцевой области, по крайней мере, при $\tilde{h} = (h/R) \leq 0.2$.

Тем не менее, граница появления макровихрей достаточно хорошо оценивается зависимостью (5), полученной методами линейной теории гидродинамической устойчивости (рис.4).

Численный анализ также показывает, что с уменьшением скорости отсоса жидкости (v_o) от заведомо больших значений до критических, в тонком ламинарном пограничном слое до возникновения макровихрей развивается турбулентность. Толщина турбулентного слоя растет до

значений, приближающихся к высоте кольцевой области. И только после этого по всей высоте кольцевой области, как показано на рис. 3, начинают появляться вторичные течения в виде квазительоровских макровихрей. Этот вывод иллюстрируется графиками на рис. 5, где представлены распределения (профили) безразмерной окружной скорости по высоте кольцевой области. Для сравнения на рис. 5 приводится также ламинарный профиль скорости, полученный аналитически (формула (1)).

Влияние внешней стенки начинает проявляться при достаточно большой толщине пограничного слоя. Для определенности можно сказать, что существенные различия в профилях v_φ и (особенно) относительной турбулентной вязкости ($\tilde{\nu}_t = \nu_t/\nu$) появляются после того, как толщина пограничного слоя приближается к половине высоты кольцевой области для наименьшего из рассматриваемых значений \tilde{h} .

Однако, как видно из рис. 4, этот факт не влияет существенным образом на значение $(v_o)_{cr}$, определяющее границу возникновения макровихрей. В то же время, при больших \tilde{h} уровень турбулентности, для значений v_o , приближающихся к $(v_o)_{cr}$, выше.

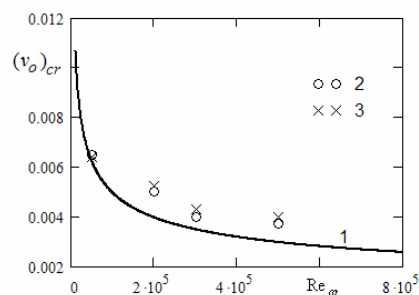


Рис. 4. Граница появления макровихрей в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра с отсосом жидкости: 1 – зависимость (5); 2 – численный расчет $\tilde{h} = 0.1$; 3 – численный расчет $\tilde{h} = 0.2$

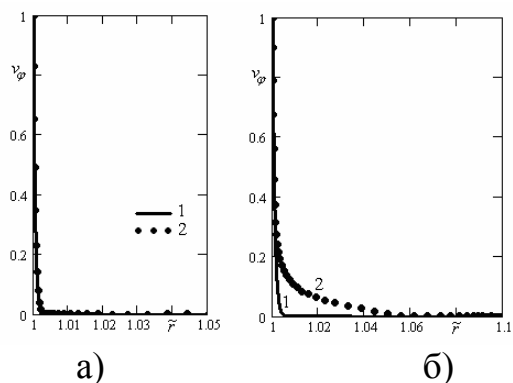


Рис. 5. Профили безразмерной окружной скорости снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра при $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$, $v_o = 0.01$ (а) и $v_o = 0.0055$ (б): 1 – аналитическое решение (1), ламинарная модель; 2 – численное решение (модель турбулентности Ментера)

3. Выводы

Выполненными исследованиями определена граница центробежной потери устойчивости потоком снаружи вращающегося проницаемого цилиндра с протеканием жидкости через его поверхность (отсосом). Методом малых возмущений получено аналитическое выражение нейтральной кривой устойчивости, определяющей наименьшие (критические) значения безразмерной скорости отсоса, соответствующие появлению вторичных течений. Расчетный анализ на основе подробного численного решения уравнений Рейнольдса, замкнутых на основе SST $k-\omega$ модели турбулентности в низкорейнольдсовой формулировке, продемонстрировал близость критических значений $(v_o)_{cr}$ к результатам линейного анализа с небольшим уточнением в сторону увеличения этих значений в области больших чисел Re_ϕ ($Re_\phi > 10^5$). Показано, что возникновению макровихрей предшествует турбулизация пограничного слоя на поверхности вращающегося цилиндра и рост его толщины до значений, близких к высоте кольцевой области. С увеличением этой высоты критические значения скорости отсоса существенным образом не изменяются. Влияние высоты \tilde{h} на профили осредненной окружной скорости и турбулентной вязкости проявляется только при приближении скорости отсоса v_o к критическим значениям $(v_o)_{cr}$.

Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании ротационных фильтров механической очистки жидкостей и других технических устройств с протоком жидкости через вращающийся цилиндр.

Список литературы: 1. Коваленко В.П. Смазочные и гидравлические масла для угольной промышленности: Справочник / В.П. Коваленко, З.Л. Финкельштейн.– М.:Недра, 1991.– 294 с. 2. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук.– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996.– Т.2: Вращающиеся системы.– 289 с. 3. Taylor G.I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders / G.I. Taylor // Phil. Trans. Roy. Soc. London. A.– 1923.– V.223.– P. 289 – 343. 4. Coles D. Transition in circular Couette flow / D. Coles // J. Fluid Mech.– 1965.– V.21.– P.385 – 425. 5. Мочалин Е.В. Движение жидкости в окрестности вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин // Вісник Східноукраїнського національного університету.– 2003.– №12(68), Ч.2.– С.197 – 202. 6. Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей / [А.А. Халатов, И.В. Шевчук, А.А. Авраменко и др.].– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1999.– 300 с. 7. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук.– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996.– Т.1: Криволинейные потоки.– 290 с. 8. Мочалин Е.В. Гидродинамическая устойчивость в рабочей полости ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // Промислова гідраліка і пневматика.– 2005.– №4(10).– С. 50 – 54. 9. 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. 10. Мочалин Е.В. Выбор модели турбулентности для анализа течения снаружи вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин // Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2007.– № 2/6 (26).– С. 20 – 26.

Поступила в редколлегию 01.12.2010