УДК 536.252:532.527.2

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ПОТОКЕ КУЭТТА-ТЭЙЛОРА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ

Мочалин Е.В.

Донбасский государственный технический университет, Алчевск, Украина

АННОТАЦИЯ

Исследуется течение несжимаемой жидкости между неподвижным внешним и вращающимся внутренним проницаемыми цилиндрами с отсосом и вдувом жидкости через внутренний цилиндр. Результаты численного моделирования, воспроизводящего различные режимы течения: от устойчивого ламинарного до турбулентного макровихревого движения жидкости, сопоставлены с данными линейного анализа центробежной устойчивости. Подтверждена возможность стабилизации течения без макровихрей за счет отсоса жидкости в широком диапазоне угловых скоростей, а также применимость результатов линейной теории для оценки границы возникновения вихрей Тэйлора.

Обнаружены существенные различия между данными линейного анализа и численного моделирования для случая вдува жидкости. Отмечено влияние дискретного вдува через продольные щели на характер течения в кольцевой области.

Продемонстрирована возможность значительного повышения теплоотдачи от вращающегося цилиндра путем отсоса жидкости через его поверхность.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию течения жидкости между соосными вращающимися цилиндрами, которое называют течением Куэтта-Тэйлора, посвящено огромное число публикаций. Мы не будем здесь приводить их подробный обзор и характеристику всех основных аспектов этого течения. Отметим только, что гидродинамические и тепловые процессы в потоках между вращающимися соосными цилиндрами во многом определяют энергоэффективность и потребительские характеристики очень многих технических систем.

Большинство известных теоретических и экспериментальных результатов относятся к классическому случаю непроницаемых гладких границ кольцевой области течения при наличии только окружного вынужденного движения жидкости, обусловленного вращением одного или обоих цилиндров. Однако, в прикладном аспекте почти всегда приходится иметь дело с различными дополнительными факторами, осложняющими анализ. К таким факторам можно отнести: шероховатость и рельеф поверхности цилиндров, их несоосность, вынужденное осевое течение жидкости, а также вынужденное радиальное течение через проницаемые поверхности цилиндров. При рассмотрении влияния этих факторов преобладает экспериментальный подход, что объясняется сложностью постановки и последующего решения соответствующих математических задач. А трудоемкость и высокая стоимость экспериментальных исследований объясняют ограниченный характер выполненных в этом направлении исследований. Причем наименьшее число известных публикаций посвящено изучению потока Куэтта-Тэйлора с наложенным вынужденным радиальным течением, через проницаемые поверхности. Анализ этого течения является предметом настоящего исследования.

© Мочалин Е.В.

АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Остановимся на рассмотрении случая с неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндром, который является достаточно распространенным в технических приложениях. В работе [1] методами линейной теории гидродинамической устойчивости получены нейтральные кривые устойчивости кругового ламинарного течения Куэтта (границы возникновения маровихрей или вихрей Тэйлора) при протоке жидкости внутрь вращающегося внутреннего цилиндра и в обратном направлении. Два указанных варианта вынужденного радиального течения мы будем для краткости называть случаями отсоса и вдува жидкости через поверхность вращающегося цилиндра. В работе [1] рассматривается равномерное распределение радиальной скорости по поверхностям обоих цилиндров. Интенсивность отсоса (вдува) характеризуется радиальным числом Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_r = V_1 R_1 / \nu ,$$

где V_1 − скорость протекания жидкости через поверхность вращающегося цилиндра; R_1 − его радиус; ν − кинематическая вязкость жидкости.

Авторы отдельно рассматривают случаи малых радиальных скоростей ($|\mathrm{Re}_r| < 100$) и асимптотический случай ($|\mathrm{Re}_r| \to \infty$). Интенсивность вращательного движения характеризуется числом Тэйлора Ta, которое определяется специфическим выражением, отличным от общепринятых большинством авторов формулировок. Полученные результаты демонстрируют стабилизирующее влияние отсоса жидкости в смысле сдвига границы центробежной потери устойчивости в сторону больших чисел Ta. Влияние вдува на устойчивость проявляется, по началу, в незначительном снижении критических значений Ta_{cr} (дестабилизация) с последующим их монотонным увеличением (стабилизация). На основе асимптотического решения показано, что при больших значениях $|\mathrm{Re}_r|$ относительная ширина кольцевой области $\tilde{h} = (R_2 - R_1)/R_1$ (R_2 − радиус внешнего цилиндра) не влияет на критические значения Ta_{cr}, что дает в этой области единую кривую нейтральной устойчивости.

Результаты, полученные в работе [2] методами линейной теории гидродинамической устойчивости в осесимметричной постановке подтверждают стабилизирующее влияние отсоса жидкости и интенсивного вдува, а также дестабилизирующее влияние слабого вдува. В работе [3] ламинарное течение между вращающимся внутренним и неподвижным внешним равномерно проницаемыми цилиндрами исследовано путем прямого численного моделирования в полной трехмерной постановке при относительно малых значениях скоростей отсоса и вдува ($|\mathrm{Re}_r| \le 30$). При этом продемонстрировано очень хорошее совпадение с данными линейного анализа по определению границы возникновения макровихрей и проанализированы особенности влияния отсоса и вдува на характер ламинарных макровихревых режимов течения. Для обобщения результатов по интенсивности вращательного движения авторы работ [2,3] используют число Рейнольдса, определяемое следующим образом:

$$\mathrm{Re}_h = \frac{\Omega R_1 h}{\nu}, \qquad (1)$$

где Ω - угловая скорость вращающегося цилиндра, h - ширина кольцевой области между цилиндрами.

В монографии [4] систематизированы результаты анализа устойчивого кругового течения Куэтта-Тэйлора с отсосом жидкости, численного линейного анализа центробежной устойчивости такого течения и численного анализа макровихревых ламинарных и турбулентных течений с протоком жидкости через поверхность вращающегося цилиндра. Показано, что критическое значение Ta_{cr} (или $(\mathrm{Re}_h)_{cr}$), соответствующее появлению макровихрей, перестает зависеть от относительной ширины кольцевого зазора ($\tilde{h}$) с того момента, когда под влиянием отсоса слой закрученной внутренним цилиндром жидкости становится тоньше ширины зазора между цилиндрами. В этом смысле появляется основание говорить о пограничном слое по окружной скорости у поверхности вращающегося проницаемого цилиндра. Такой характер первичное устойчивое течение имеет при $|\mathrm{Re}_r| \ge 100$, за исключением очень тонких зазоров ($\tilde{h} < 0.1$). Поэтому при достаточно больших $|\mathrm{Re}_r|$ вместо числа Рейнольдса, определяемого зависимостью (1), правильнее использовать в качестве параметра подобия вращательное число Рейнольдса в виде

$$\mathrm{Re}_\varphi = \frac{\Omega R_1^2}{\nu}.$$

При малых $|\mathrm{Re}_r|$, когда проявляется влияние ширины кольцевой области, можно использовать для обобщения результатов оба параметра (Re_φ, $\tilde{h}$) совместно.

Данные линейного анализа устойчивости [1,4] демонстрируют возможности затягивания перехода к макровихревому течению до очень больших значений угловой скорости (Re_φ) за счет соответствующего увеличения $|\mathrm{Re}_r|$. Однако, для проверки этих результатов в более полной постановке и исследования особенностей возникновения и развития неустойчивости при больших значениях $|\mathrm{Re}_r|$ Re_φ, требуется расчетный анализ турбулентных потоков вблизи вращающихся проницаемых поверхностей, что представляет собой очень сложную проблему. Наиболее убедительным в настоящее время является прямое численное моделирование (DNS) турбулентных течений, которое не требует добавочных эмпирических соотношений. Однако, даже на современном уровне развития параллельных вычислений, этот подход практически применим при относительно небольших числах Рейнольдса, характеризующих развитие турбулентности. В частности, для турбулентного течения между непроницаемыми вращающимися цилиндрами известно успешное применение DNS [5,6] при $\mathrm{Re}_\varphi < 10^4$. В [4] обосновано применение к исследованию течения рассматриваемого здесь типа численного решения, полученного методом конечных объемов на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Авторами проанализировано применение ряда замыкающих моделей турбулентности и сделан вывод о предпочтительности SST k-ω модели Ментера. В последующих исследованиях [7] показано, что применение модели переноса напряжений Рейнольдса (RSM) обеспечивает лучшее совпадение с экспериментальными данными по гидродинамике и теплообмену в потоке Куэтта-Тэйлора, известными для случая непроницаемых цилиндров. Этот факт можно объяснить тем, что модель RSM изначально учитывает анизотропию турбулентности, которая имеет место в закрученных течениях. На основе разработанных в [4] подходов к расчетному анализу потоков вблизи вращающегося проницаемого цилиндра имеется возможность теоретического анализа гидродинамических и тепловых процессов в потоке Куэтта-Тэйлора с интенсивным отсосом и вдувом, что позволяет рассматривать течения в диапазоне $|\mathrm{Re}_r| < 10^4$, $\mathrm{Re}_\varphi < 10^6$.

Целью настоящей работы является сопоставление известных результатов по устойчивости первичного кругового течения Куэтта с отсосом и вдувом в диапазоне $|\mathrm{Re}_r| \le 10^4$, полученными методами линейной теории гидродинамической устойчивости, с данными численного моделирования в более подробной постановке, а также оценка влияния вынужденного радиального течения на теплообмен в потоке Куэтта –Тэйлора.

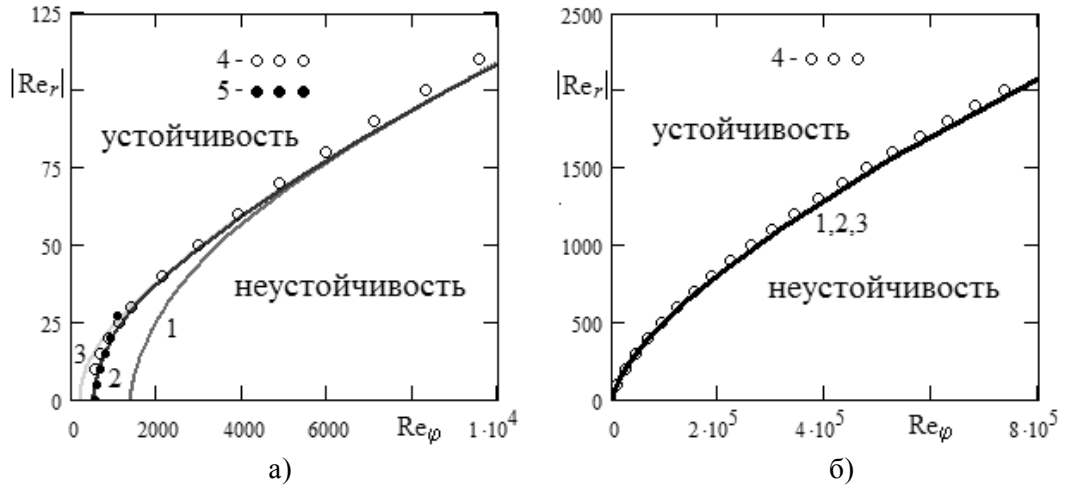
ВЛИЯНИЕ ОТОСА И ВДУВА НА ГРАНИЦУ ПЕРЕХОДА К МАКРОВИХРЕВОМУ ДВИЖЕНИЮ

На рис.1 (а,б) представлены в разном масштабе по оси абсцисс нейтральные кривые центробежной устойчивости для потока между вращающимся внутренним и неподвижным внешним проницаемыми цилиндрами при отсосе жидкости через внутренний цилиндр. Распределение радиальной скорости по поверхностям обоих цилиндров равномерное. Данные получены различными авторами на основе приближенного решения задачи на собственные значения для линеаризованных уравнений осесимметричного возмущенного движения. Различия заключаются в формулировках спектральной задачи и методах приближенного решения. Пересечения с осью абсцисс на рис.1а определяют критические числа Рейнольдса, соответствующие возникновению вихрей Тэйлора между непроницаемыми цилиндрами при соответствующих значениях ширины кольцевой области.

Данные работы [1] отображены путем сращивания графической зависимости, представленной авторами (в несколько отличных координатах) для случая $|\mathrm{Re}_r| \le 50$, с представленным в этой работе аналитическим выражением, определяющим границу устойчивости в асимптотическом случае $|\mathrm{Re}_r| \to \infty$. Как можно видеть, асимптотическая зависимость близка к более подробному результату, полученному в [4] в диапазоне $|\mathrm{Re}_r| \ge 100$. В работе [4] подтверждается также факт независимости нейтральной кривой от ширины зазора между цилиндрами при $|\mathrm{Re}_r| \ge 100$. Для аналитического представления этой кривой в [4] предложена зависимость

$$(\mathrm{Re}_r)_{cr} = 0.26\,\mathrm{Re}_\varphi^{0.65} + 3.3\cdot 10^{-4}\,\mathrm{Re}_\varphi . \qquad (2)$$

При малых значениях скорости отсоса ($|\mathrm{Re}_r| \le 50$), данные всех рассматриваемых здесь работ хорошо согласуются между собой



а) б)

Рис.1 Границы центробежной устойчивости в случае отсоса жидкости: 1– [4], $\tilde{h} = 0.1$; 2– [4], $\tilde{h} = 0.2$; 3– [4], $\tilde{h} = 0.4$; 4– [1], $\tilde{h} = 0.25$; 5– [3], $\tilde{h} = 0.176$.

с учетом сопоставимости значений параметра $\tilde{h}$, характеризующего ширину кольцевого зазора.

Метод малых возмущений не позволяет оценить влияние нелинейных эффектов на развитие возмущений, приводящих к образованию макровихрей. Кроме того, этот метод не учитывает возможности развития турбулентности вблизи вращающегося цилиндра при больших значениях Re_φ до проявления центробежной неустойчивости. В то же время, на возможность такой ситуации в результате стабилизации под действием интенсивного отсоса жидкости первичного кругового вращательного течения в пограничном слое на проницаемом цилиндре, указывают некоторые расчетные результаты, представленные в монографии [4]. Следовательно, представляет интерес проверка представленных выше данных о границе перехода к макровихревому движению путем численного моделирования на основе более полных нелинейных уравнений движения жидкости. Такая проверка была выполнена в [3] для случаев относительно малой интенсивности отсоса и вдува ($|\mathrm{Re}_r| \le 30$), когда в результате центробежной неустойчивости первичное вращательное ламинарное течение, заполняющее весь зазор между цилиндрами, переходит в ламинарное течение с макровихрями. Результаты непосредственного численного моделирования продемонстрировали очень хорошее совпадение критических значений $\mathrm{Re}_r^{cr}(\mathrm{Re}_\varphi)$ с данными линейного анализа.

Однако в [4] продемонстрирована возможность ситуаций, когда при достаточно большой интенсивности отсоса жидкости первичное вращательное движение жидкости сосредоточено в пограничном слое у поверхности вращающегося цилиндра, который может быть как ламинарным, так и турбулентным. А в результате центробежной неустойчивости переход осуществляется либо к ламинарному, либо к турбулентному макровихревому движению, заполняющему всю кольцевую область. Поэтому рассмотрим далее результаты численного анализа по определению границы возникновения макровихрей в диапазоне $\mathrm{Re}_\varphi < 10^6$, охватывающем все возможные варианты.

Ограничимся здесь краткой характеристикой постановки задачи. В качестве исходных уравнений при рассмотрении ламинарных режимов течения рассматриваются уравнения Навье-Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости и уравнение неразрывности. При анализе турбулентных течений эти же уравнения используются в осредненной по Рейнольдсу форме вместе с уравнениями переноса всех компонент тензора турбулентных (Рейнольдсовых) напряжений. В пристеночной области решаются также уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и удельной скорости ее диссипации, что позволяет учитывать граничные условия в соответствии с низкорейнольдсовой версией k–ω модели турбулентности на сетке, обеспечивающей разрешение ламинарного подслоя.

Подробное описание и верификация численного решения по методу конечных объемов приведены в [4]. Расчетные схемы области течения,

используемые для получения представленных далее результатов, приведены на рис.2, 3.

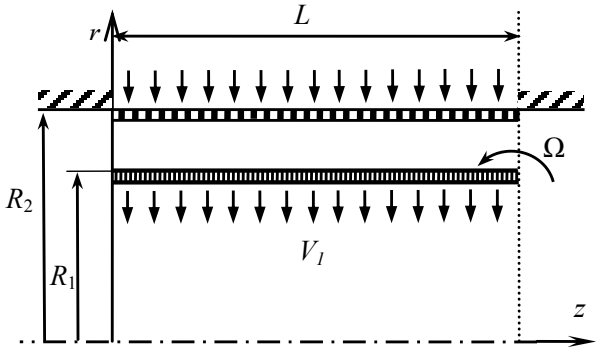


Рис.2 Расчетная схема области течения в осесимметричной постановке.

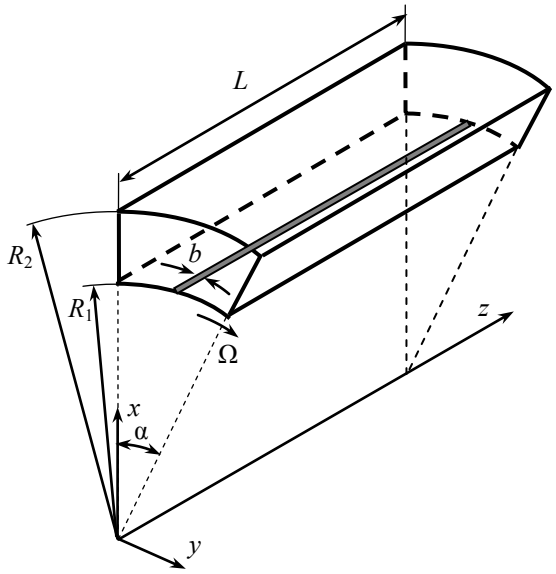


Рис.3 Расчетная схема периодического фрагмента кольцевой области течения снаружи вращающегося цилиндра с протоком жидкости через продольные щели в его поверхности.

По схеме на рис.2 рассматривается осесимметричное течение жидкости с равномерно распределенным по поверхности вращающегося цилиндра отсосом либо вдувом. Радиальная скорость на внутренней поверхности неподвижного внешнего цилиндра также распределена равномерно.

На поверхностях цилиндров ($r = R_1; r = R_2$) используются условия «прилипания» для осевой и окружной компонент скорости, а радиальная компонента задается в соответствии с рассматриваемой скоростью отсоса (вдува). Граничные условия для напряжений Рейнольдса в пристеночных областях рассчитываются через величины k и ω, которые, в свою очередь определяются в соответствии с низкорейнольдсовой k – ω моделью. Соответствующая процедура описана в работе [8].

На границах ($z = 0; z = L$) используются периодические граничные условия в осевом направлении. В этом случае, при исследовании режимов течения с макровихрями, выбор размера L принудительно задает размер вихрей, поскольку он должен быть кратен осевой длине пары вихрей противоположного вращения. Несмотря на последнее обстоятельство, периодические условия часто используются при численном моделировании течения Куэтта-Тэйлора [5,6], когда в центре внимания не находятся торцевые эффекты, точные размеры и число вихрей. В работе [6] для случая турбулентного макровихревого течения между непроницаемыми цилиндрами при $Re_\varphi = 8000$ выполнена проверка влияния длины периодического расчетного фрагмента на интегральные характеристики потока, в частности, интегральный коэффициент момента трения (C_m) на поверхностях вращающегося и неподвижного цилиндров. В итоге, прямым численным моделированием продемонстрировано, что изменение длины L в 1.5 и 2 раза, при неизменной ширине кольцевой области h, приводит к изменениям C_m в пределах 1 %. Нами также выполнены подобные исследования для значений $Re_\varphi = 2\cdot10^4$, $Re_\varphi = 2\cdot10^5$. При этом отклонения интегральных характеристик потока, обусловленных вариацией длины периодического фрагмента, также не превысили 1 %.

Расчетная схема на рис.3 используется при расчете трехмерного течения и позволяет исследовать случай дискретной проницаемости вращающегося внутреннего цилиндра. В частности, рассматривается проток жидкости через продольные щели шириной b.

На внутренней поверхности внешнего неподвижного цилиндра ($r = R_2$) используются такие же граничные условия, как и в рассмотренном выше осесимметричном случае. На непроницаемой внешней поверхности вращающегося цилиндра ($r = R_1$) используются граничные условия «прилипания» для всех компонент скорости. На этой же поверхности в пределах щели для радиальной компоненты скорости задается значение рассматривае-

мой скорости отсоса либо вдува. На границах ($z = 0; z = L$) также используются периодические граничные условия в осевом направлении. На оставшихся двух границах задаются периодические в окружном направлении условия.

На рисунке 4 вместе с нейтральной кривой устойчивости, полученной методом малых возмущений, обозначены точки, соответствующие появлению макровихрей при численном моделировании в более подробной постановке. Приведенные на этом рисунке результаты соответствуют случаю отсоса жидкости.

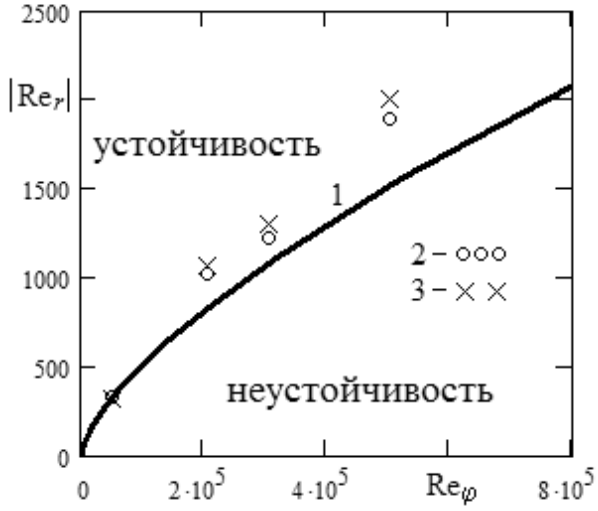


Рис.4 Сопоставление данных о границе центробежной устойчивости в случае отсоса жидкости: 1 – линейная теория (зависимость (2)); 2 – численный анализ, $\tilde{h} = 0.1$; 3 – численный анализ, $\tilde{h} = 0.2$.

Как можно видеть, данные линейного анализа достаточно хорошо согласуются с результатами уточненных расчетов. Особенно близкое совпадение имеет место при $\mathrm{Re}_\varphi < 10^4$ ($|\mathrm{Re}_r|<500$), где потеря устойчивости при наличии отсоса жидкости приводит к ламинарному макровихревому движению, что уже продемонстрировано в [3] при $|\mathrm{Re}_r|\leq 30$. С возрастанием Re_φ уточненные расчеты демонстрируют увеличение $|\mathrm{Re}_r^{cr}|$, по сравнению с данными линейного анализа, что можно объяснить турбулизацией пограничного слоя до центробежной потери устойчивости. Однако, и в этом случае результаты, полученные методом малых возмущений, можно использовать для приближенной оценки критических значений скорости отсоса жидкости. Численный анализ также подтверждает практическую независимость границы устойчивости от ширины кольцевой области в тех случаях, когда пограничный слой по окружной скорости в первичном течении тоньше ширины кольцевого зазора.

Результаты, представленные на рис.4, получены с применением расчетной схемы на рис.2 (в осесимметричной постановке). Однако, трехмерное моделирование по схеме на рис.3 дает очень близкие результаты по границе возникновения макровихрей, по крайней мере, при 16 щелях для отсоса жидкости с общим коэффициентом «живого» сечения $k_S = 0.17$.

Совсем по иному обстоит дело с корреляцией результатов линейного анализа и уточненного численного моделирования в случае вдува жидкости. На рис.5 представлены данные сопоставления результатов по центробежной устойчивости, полученных в линейном приближении и уточненным численным анализом в осесимметричной постановке.

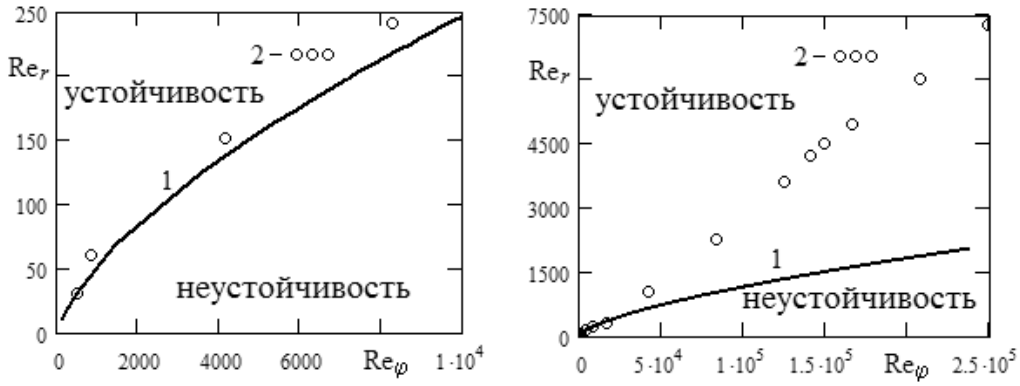


Рис.5 Сопоставление данных о границе центробежной устойчивости в случае вдува жидкости: 1– линейная теория (данные [1]); 2– численный анализ, $\tilde{h} = 0.3$ (осесимметричная постановка).

При $\mathrm{Re}_r < 50$ наши результаты полностью согласуются с данными [3]. Но с увеличением $\mathrm{Re}_\varphi, \mathrm{Re}_r$ численное моделирование демонстрирует все возрастающее отличие значений от Re_r^{cr} соответствующих данных линейного анализа.

На рис.6 рассмотренные выше результаты дополнены данными расчетов в трехмерной постановке для случая дискретного вдува через 16 равномерно расположенных продольных щелей с коэффициентом «живого» сечения $k_S = 0.17$. Расчеты показывают, что в случае дискретного вдува через продольные щели, в области малых значений стабилизация возможна при значениях Re_r, близких к критическим значениям, определенным методом малых возмущений и численным моделированием в осесимметричной постановке. Однако при дальнейшем увеличении интенсивности вдува (Re_r) наступает дестабилизация и переход к макровихревому движению. А при $\mathrm{Re}_\varphi > 1000$ отсутствует сама возможность стабилизации первичного течения без макровихрей вдувом жидкости через продольные щели.

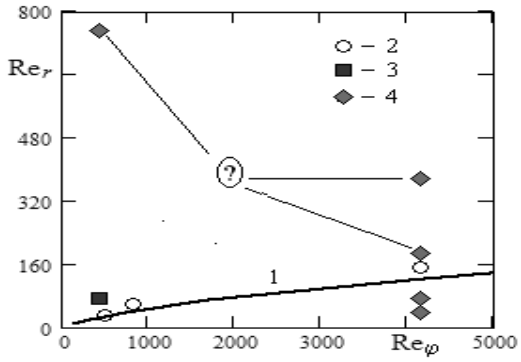


Рис.6 Данные 3d-моделирования (вдув через 16 щелей, $k_S = 0.17$) о характере течения жидкости и результаты определения границы устойчивости методом малых возмущений и численным моделированием в осесимметричной постановке: 1 линейный анализ [1]; 2 численное моделирование в осесимметричной постановке; 3 3d-моделирование, отсутствие макровихрей; 4 3d-моделирование, макровихревое течение.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОТСОСЕ ЖИДКОСТИ

Для исследования влияния вынужденного радиального течения на теплообмен в потоке Куэтта-Тэйлора, система разрешающих уравнений была дополнена уравнением переноса тепла, следующим из уравнения энергии. При этом учтены условия несжимаемости жидкости и допущение о независимости физических свойств среды от температуры. Опущены также слагаемые, соответствующие тепловыделению за счет вязкого трения. Такие допущения исключают из рассмотрения эффекты свободной конвекции. Однако, влияние последних, даже в случае непроницаемых поверхностей цилиндров, проявляется преимущественно при относительно малых Re_φ. Это влияние, в частности, проявляется [9] в более позднем возникновении вихрей Тэйлора и в повышении теплоотдачи от вращающегося цилиндра в течении без макровихрей. Нас же, в первую очередь, интересует влияние вынужденного окружного движения жидкости в сочетании с вынужденным радиальным течением в самом широком диапазоне $\mathrm{Re}_\varphi, \mathrm{Re}_r$.

Рассмотрим здесь важный в технических приложениях вопрос о влиянии отсоса жидкости на теплоотдачу от вращающегося цилиндра. В качестве количественной характеристики будем рассматривать число Нуссельта, определенное следующим образом:

$$\mathrm{Nu} = \frac{2(R_2 - R_1)q_1}{(T_2 - T_1)\lambda}, \qquad (3)$$

где $T_1.T_2$ температуры поверхностей внутреннего и внешнего цилиндров, q_1 - удельный тепловой поток через поверхность внутреннего цилиндра, λ - коэффициент теплопроводности жидкости.

Известно, что коэффициент теплоотдачи от вращающегося непроницаемого внутреннего цилиндра возрастает с увеличением его угловой скорости. Это связано с переходом к макровихревым режимам течения, интенсифицирующим конвективный перенос тепла, а также, с развитием турбулентности. При этом, однако увеличивается и момент гидродинамического сопротивления, характеризующий затраты энергии на вращение цилиндра.

Одним из изученных экспериментально [9,10] способов интенсификации теплоотда-

чи от вращающегося цилиндра в кольцевом зазоре, является использование продольных пазов в поверхности цилиндра. На рис.7 представлены графически данные сопоставления упомянутых выше двух способов повышения коэффициента теплообмена между цилиндром и потоком со случаем отсоса жидкости через 16 продольных щелей в поверхности цилиндра с коэффициентом «живого» сечения 0.17. По оси ординат отложены числа Нуссельта, отнесенные к соответствующему значению для базового варианта гладкого непроницаемого цилиндра ($\mathrm{Re}_r = 0$) при угловой скорости, соответствующей значению $\mathrm{Re}_\varphi = 4\cdot 10^4$ (ламинарное макровихревое движение). По оси абсцисс отложены отношения суммарного момента гидродинамического трения к его значению в базовом варианте.

Отметим, что представленные результаты для случая отсоса жидкости не учитывают затраты энергии на поддержание вынужденного радиального течения. Последние можно оценить на основе перепада давлений между входным и выходным сечениями. Однако здесь существенную роль вносят конструктивные особенности подвода жидкости к внешнему цилиндру и отвода из внутреннего. Это отдельные сложные вопросы, которые здесь не рассматриваются.

Еще одним источником затрат энергии является изменение момента количества движения жидкости при протекании через вращающийся цилиндр. Таким образом, следует заметить, что суммарный прирост потерь в случае отсоса жидкости может быть существенно больше того значения, которое определяется приростом момента гидродинамического трения на поверхности цилиндра.

И, тем не менее, из представленных на рис.7 данных можно увидеть, что отсос жидкости через поверхность вращающегося цилиндра предоставляет существенно большие возможности для увеличения теплоотдачи от его поверхности, чем другие наиболее известные способы.

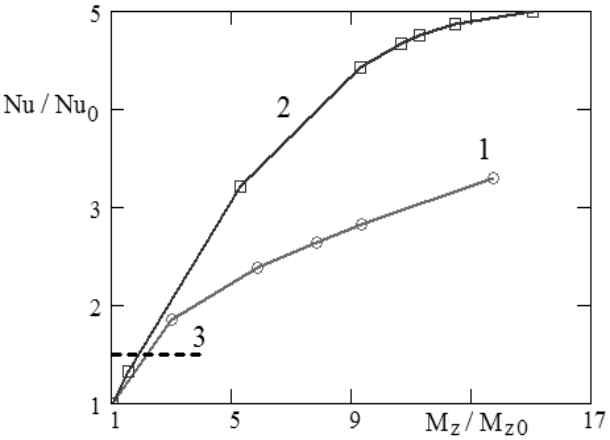


Рис.7 Сопоставление данных по интенсификации теплоотдачи от вращающегося цилиндра различными способами (Pr=0.74): 1 увеличение угловой скорости цилиндра ($\mathrm{Re}_r = 0, \mathrm{Re}_\varphi = 4\cdot 10^4 \ldots 2\cdot 10^5$); 2 отсос через продольные щели ($\mathrm{Re}_r = 0 \ldots 1.5\cdot 10^3, \mathrm{Re}_\varphi = 4\cdot 10^4$); 3 – максимальное повышение теплоотдачи за счет продольных пазов ($\mathrm{Re}_r = 0, \mathrm{Re}_\varphi = 4\cdot 10^4$).

На теплообмен между вращающимся цилиндром и потоком существенно влияет количество и размер щелей для протока жидкости. В то же время этот фактор значительно слабее влияет на гидродинамическое сопротивление. Ограничимся здесь констатацией этого факта, поскольку исследование этого вопроса выходит за рамки настоящей публикации.

ВЫВОДЫ

Выполненными исследованиями подтверждается принципиальная возможность стабилизации потока Куэтта-Тэйлора путем отсоса жидкости через внутренний вращающийся цилиндр при всех значениях Re_φ, характеризующих угловую скорость и размеры цилиндра, в диапазоне $\mathrm{Re}_\varphi < 10^6$. Показана применимость во всем этом диапазоне результатов линейного анализа устойчивости к оценке границы возникновения макровихрей (с учетом возрастающего с увеличением Re_φ занижения $\left|\mathrm{Re}_r^{cr}\right|$ в линейном приближении). Уточненным численным моделированием подтвержден также факт независимости границы возникновения макровихрей ($\mathrm{Re}_r^{cr}(\mathrm{Re}_\varphi)$) от ширины зазора между цилиндрами в случаях, когда до потери устойчивости окружное движение заполняет не весь кольцевой зазор, а под действием отсоса сосре-

доточено в пограничном слое у вращающегося цилиндра.

Для случая вдува жидкости через поверхность вращающегося внутреннего цилиндра продемонстрировано существенное отличие данных численного моделирования от результатов линейного анализа гидродинамической устойчивости. При условии равномерного распределения скорости вдува по всей поверхности цилиндра это отличие начинает проявляется с ростом $\mathrm{Re}_\varphi, \mathrm{Re}_r$ и заключается в существенно больших значениях Re_r^{cr}, чем дает линейная теория. При $\mathrm{Re}_\varphi=2\cdot10^5$ разница достигает 4 раз. В то же время, при малых значениях $\mathrm{Re}_\varphi, \mathrm{Re}_r$ ($\mathrm{Re}_r<50$), отмечено полное совпадение с результатами линейной теории и данными численных расчетов других авторов. В случае вдува через продольные щели отмеченные особенности заключаются в том, что при $\mathrm{Re}_\varphi<1000$ с увеличением скорости вдува от значения, обеспечивающего стабилизированное течение без макровихрей, с определенного момента наступает дестабилизация с возникновением крупномасштабных вихревых структур. С увеличением Re_φ имеет место усиление этой тенденции, приводящее к невозможности обеспечить течение без макровихрей при дискретном вдуве через продольные щели.

Выполненные исследования теплообмена в потоке Куэтта-Тэйлора с отсосом жидкости продемонстрировали возможность значительного большего повышения коэффициента теплоотдачи от поверхности вращающегося цилиндра, чем это можно получить другими известными способами. При этом потери на поверхностное трение растут существенно меньше. Однако потери, обусловленные другими факторами, имеющими место при вынужденном радиальном течении жидкости, могут быть значительными и требуют оценки.

Основными направлениями дальнейших исследований могут стать выяснение физической природы отмеченных особенностей течения со вдувом жидкости через поверхность вращающегося цилиндра, исследование влияния различных конструктивных факторов на теплообмен в потоке Куэтта-Тэйлора с отсосом и вдувом, а также более подробная оценка потерь, связанных с интенсификацией теплообмена за счет вынужденного радиального течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang S. Hydromagnetic stability of dissipative flow between rotating permeable cylinders. P.1 /S. Chang, W.K. Sartory // J. Fluid Mech.– 1967.– V.27.– pp. 65 − 79.
2. Min K. Hydrodynamic stability of viscous flow between rotating porous cylinders with radial flow / K. Min, R. M. Lueptow // Phys. Fluids.– 1994.–V.6.– P. 144.
3. Serre E. Stability of Taylor–Couette flow in a fi-nite-length cavity with radial throughflow / E. Serre, M.A. Sprague, R.M. Lueptow // Phys. Flu-ids.− 2008.− V. 20 (034106). – pp. 1 – 10.
4. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов.– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010.– Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах.– 428 с.
5. Bilson M. Direct numerical simulation of turbulent Taylor-Couette flow / M.Bilson, K. Bremhorst // J. Fluid Mech.− 2007.− V.579.− pp. 227–270.
6. Dong S. Direct numerical simulation of turbulent Taylor-Couette flow / S. Dong // J. Fluid Mech.− 2007.− V.587.− pp. 373–393.
7. Мочалин Е.В. Интенсивность обмена импульсом и теплотой в потоке снаружи вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Промислова гідравліка і пневматика.– 2011.– №4(34).– С. 11 − 14.
8. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD / D.C. Wilcox.– La Canada, California: DSW Industries, 1998.– 537 p.
9. Gardiner S.R.M. Heat transfer in an annular gap / S.R.M. Gardiner, R.H. Sabersky // Int. J. Heat Mass Transfer.− 1978.− V.21.− pp. 1459–1466.
10. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплоотдача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. М., Энергия, 1974. 560 с.