

01;03

Идентификация самоорганизующихся вихревых структур при численном моделировании ламинарного пространственного обтекания лунки на плоскости потоком вязкой несжимаемой жидкости

© С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Д.П. Фролов, В.Б. Харченко

Академия гражданской авиации, С.-Петербург
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Поступило в Редакцию 8 октября 1997 г.

При решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений Навье-Стокса в рамках упрощенного подхода на основе аналитического задания метрических коэффициентов анализируются пространственные стационарные вихревые структуры, самоорганизующиеся при обтекании глубокой сферической лунки на плоскости.

Генезис проблемы вихревой интенсификации тепломассообменных процессов, обусловленной генерированием самоорганизующихся вихревых структур при обтекании низкоскоростным потоком упорядоченных криволинейных рельефов, в частности сферических лунок, основан прежде всего на десятилетнем цикле экспериментальных исследований (Кикнадзе Г.И., Рабинович М.И., Готовский М.А., Терехов В.И., Козлов А.П. и др.). Обнаруженные в [1,2] смерчеобразные вихри вблизи поверхностей, покрытых сферическими лунками или содержащих полусферическую лунку на одной из стенок канала, в [3,4] подвергнуты систематическому анализу на основе детального рассмотрения нестационарного механизма формирования вихрей в изолированной лунке в режиме развитого турбулентного течения. В [5] подчеркнуто, что организация крупномасштабных вихревых структур в пристеночной области турбулентного течения вблизи поверхности, покрытой сферическими лунками, позволяет не только интенсифицировать тепло- и массообменные процессы, но также уменьшить гидродинамические

потери, связанные с движением жидкости, в частности, за счет снижения сопротивления трения. Однако это утверждение в [6] подвергнуто сомнению из-за его недостаточного экспериментального обоснования. Кроме того, рассматриваемый способ вихревой интенсификации теплообменных процессов там же связывается с искусственной турбулизацией пристеночного течения. В целом экспериментальные подходы решения данной проблемы обнаружили ряд трудностей при оценке сложной вихревой картины течения и неоднозначных выводов по эффективности рассматриваемого типа вихревой интенсификации. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости более детального управляющего механизма генерации вихрей, индуцированных благодаря рельефам из вогнутостей, на основе использования методов численного моделирования в качестве инструментов подробного диагностирования поля течения с выделением его наиболее существенных черт.

На протяжении последних пяти лет последовательно развивается численное моделирование крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в пристеночной области ламинарного и турбулентного течения несжимаемой вязкой жидкости в окрестности сферической лунки на плоскости [7–12]. Исследования, результаты которых опубликованы в [7,8], выполнены в упрощенной постановке в предположении о симметричности безотрывного течения относительно геометрической плоскости симметрии, проходящей через центр неглубокой лунки. В [9] подобный подход использован для анализа вихревой структуры отрывного течения в глубокой лунке. В [10–12] систематизированы результаты компьютерной визуализации вихревого течения в окрестности лунки, в том числе при нестационарном характере развития процесса, а также при блокировке течения в тонком, прилегающем к стенке слое.

В данном численном исследовании центральное место уделено детальному анализу управляющего механизма генерации вихрей в пристеночном потоке несжимаемой вязкости жидкости в окрестности уединенной сферической вогнутости на гладкой стенке и идентификации пространственных вихревых структур методом компьютерной визуализации течения на основе наблюдения за треками меченых жидких частиц. Последовательно реализована идея сопоставления полученных численных результатов с экспериментальными данными [2], при воспроизведении в расчетах условий, близких к физическому эксперименту. Рассматриваются глубокие сферические лунки со скругленными кромка-

ми, для которых реализуется режим устойчивого ламинарного обтекания с образованием развитой отрывной зоны.

В отличие от развитых ранее подходов [7–12] по численному моделированию обтекания лунки на плоскости при использовании неортогональных, согласованных с криволинейной поверхностью сеток с расположением узловых точек в плоскостях, перпендикулярных и параллельных направлению набегающего потока со сгущением вблизи стенки и в зоне сдвигового слоя, в данном исследовании применяется цилиндрическая, согласованная с омываемой поверхностью сетка (рис. 1, *a*). Это позволяет существенно (в пять и более раз) увеличить плотность ячеек в пределах отрывной зоны. Кроме того, чтобы избежать проблем, связанных с интерполяцией метрических коэффициентов, используется упрощенный подход на основе задания аналитической метрики. Во всех остальных подробностях методология данного исследования не отличается от изложенной в [8]. С помощью неявного конечно-объемного метода в рамках концепции расщепления по физическим процессам решается система уравнений Навье-Стокса, записанная в естественных переменных для декартовых составляющих скорости. На входной границе расчетной области задается профиль скорости, соответствующий профилю Польгаузена для пограничного слоя с толщиной, равной глубине лунки. На выходных границах ставятся мягкие граничные условия (условия продолжения решения из внутренних точек на границу области). На стенке выполняются условия прилипания. В качестве параметров обезразмеривания задаются скорость набегающего потока вне пограничного слоя и диаметр лунки. Расчет стационарного обтекания лунки на плоскости выполнен на сетке, содержащей $42 \times 50 \times 61$ ячеек. Глубина лунки выбрана равной 0.22, а радиус скругления острой кромки — 0.09. Число Рейнольдса соответствует условиям проведения эксперимента в [2] и принято равным 2500.

На рис. 1, 2 представляются некоторые из численных результатов, полученных с помощью системы компьютерной визуализации пространственных полей TESPLOT.

Анализируя картину растекания жидкости (рис. 1, *b*) в близком к поверхности лунки слое, можно выявить общую (для численных и физических экспериментов) тенденцию поведения потока в отрывной зоне, заключающуюся в формировании двух крупномасштабных вихревых ячеек в пределах лунки. Характерной особенностью ячеек является существование двух фокусов в периферийной части лунки — центров

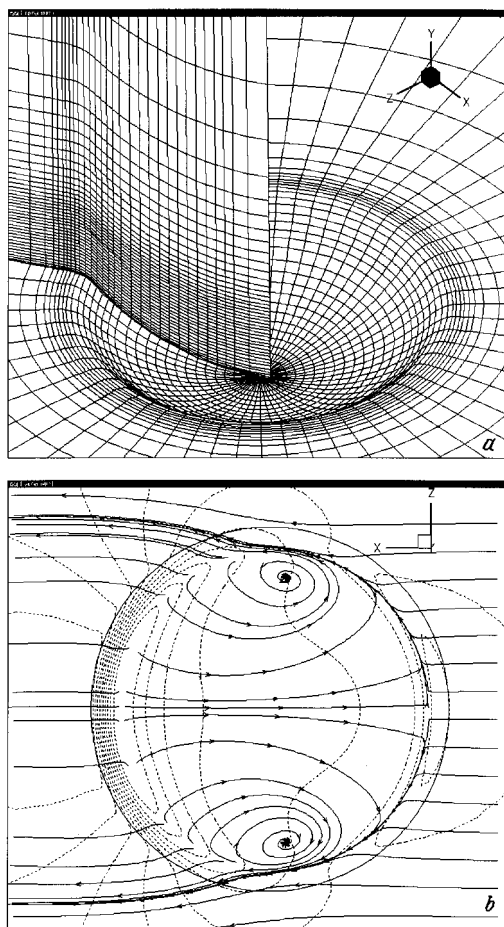


Рис. 1. Фрагмент сетки (*a*) для расчета обтекания лунки глубиной 0.22 и радиусом скругления 0.09 при числе Рейнольдса набегающего потока 2500 и картина (*b*) растекания жидкости по поверхности с лункой (в проекции на плоскость $x-z$) с нанесенными пунктирными линиями с шагом 0.002 изобарами (диапазон изменения давления, отнесенного к удвоенному скоростному напору, от -0.004 до -0.018).

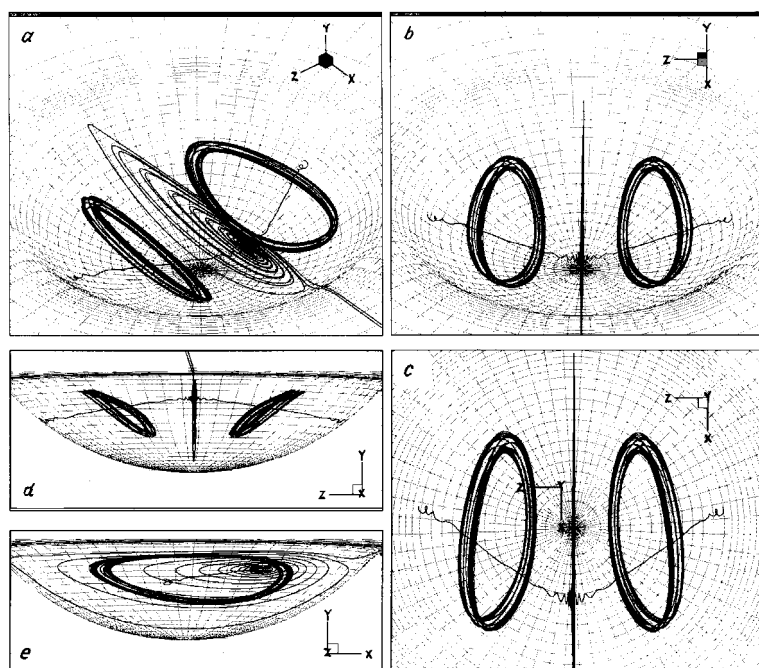


Рис. 2. Аксонометрические (*a, b*) и плоскостные (*c, d, e*) проекции пространственных картин вихревых структур, иллюстрированных траекториями жидких частиц, выпущенных в окрестности фокусов и определенных в численных экспериментах точках ($x = 0$; $y = 0.1$; $z = \pm 0.1$).

зон стекания жидкости. Однако предположение, высказанное в [2], о захвате всей жидкости в лунке и вкачивании ее в пространственную закрученную струю оказывается не вполне корректным. Очевидно, что лишь часть жидкости в небольшой зоне вблизи фокуса инициирует струю. В целом поток по поверхности лунки растекается аналогично отрывному обтеканию двумерной траншеи, хотя вихревое течение в лунке при этом носит резко выраженный пространственный характер.

Представленные на рис. 2 картины траекторий жидких частиц, введенных в окрестности фокусов и в обнаруженных в расчетах местах луночного пространства ($x = 0$; $y = 0.1$; $z = \pm 0.1$) выявили суще-

ствование устойчивых структурных элементов. Подтвердилось практически очевидное предположение [2] о подковообразной вихревой линии, соединяющей фокусы, вокруг которой навиваются раскручивающиеся спиралеобразные линии тока. Как уже отмечалось [12], в лунке реализуется закрученное струйное течение, ответственное за массоперенос от периферийной части лунки к геометрической плоскости симметрии (относительно направления набегающего потока). Понятно, что массоподвод приводит к наличию источника в плоскости симметрии и формирует струю, истекающую из лунки в указанной области.

Самым интересным результатом численных расчетов являются обнаруженные в лунке два вихревых торообразных кольца. Они представляют совокупность траекторий всего лишь двух частиц, выпущенных симметрично относительно центра лунки и показанных в течение временного промежутка 0 . . . 1 000 (безразмерных единиц). Симметричные устойчивые кольца, оси которых ориентированы по нормали к поверхности лунки, несомненно являются искомыми элементами, во многом определяющими механизм вихревой интенсификации теплообмена.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 96–02–16356.

Список литературы

- [1] Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. // Доклады АН СССР. 1986. Т. 290. № 6. С. 1315–1319.
- [2] Громов П.Р., Зобнин А.Б., Рабинович М.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 21. С. 1323–1328.
- [3] Кесарев В.С., Козлов А.П. // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1993. № 1. С. 106–115.
- [4] Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M. // Russian J. Eng. Thermophysics. 1995. V. 5. P. 11–34.
- [5] Афанасьев В.Н., Веселкин В.Ю., Леонтьев А.И. и др. // Препринт МГТУ им. Н.Э. Баумана, № 2–91. Ч. 1. М.: МГТУ. 56 с.
- [6] Дрейцер Г.А. // Труды III Минского Международного форума "Теплообмен–ММФ–96": Т. 10. Интенсификация теплообмена. Ч. 1. Минск: ИТМО. 1996. С. 26–39.
- [7] Afanasiev V.N., Chudnovsky Ya.P., Isaev S.A. et al. Proc. V Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulent Measurement. Paris. 1993. P. 391–398.

- [8] *Исаев С.А., Харченко В.Б., Чудновский Я.П.* // Инженерно-физический журнал. 1994. Т. 67. № 5–6. С. 373–378.
- [9] *Исаев С.А., Чудновский Я.П.* Тр. Первой нац. конф. по теплообмену. Т. 8. Интенсификация теплообмена. М.: МЭИ. 1994. С. 80–85.
- [10] *Isaev S.A.* // Int. Symp. Heat Transfer Enhancement in Power Machinery. Moscow. 1995. Pt 2. P. 153–156.
- [11] *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачев А.Е.* Труды III Минского Международного форума "Тепломассообмен–ММФ–96": Т. 1. Конвективный тепломассообмен. Ч. 1. Минск: ИТМО. 1996. С. 33–36.
- [12] *Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачев А.Е.* // Известия РАН. Энергетика. 1996. № 4. С. 140–148.