

А.А. Приходько, А.В. Сохацкий
Днепропетровский госуниверситет,
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОКОЛОЭКРАННОЙ АЭРОДИНАМИКЕ

Рассмотрены результаты численного и экспериментального моделировании обтекания элементов несущих систем вблизи экрана. При расчетах использовались метод дискретных вихрей, уравнения Навье-Стокса, явные и неявные приближенно-факторизованные разностные схемы, построенные на основе разностных аппроксимаций первого, второго и повышенного порядков точности. Представлены результаты исследования обтекания цилиндра, профиля и автомобиля вблизи экрана. Все расчеты выполнены в рамках интегрированного пакета прикладных программ.

1. *Введение.* Дальнейшее развитие наземного транспорта требует решения широкого круга разнообразных задач, среди которых важное место принадлежит вопросам аэродинамики. Намерения ускорить разработку транспортного аппарата требует одновременного проведения экспериментальных и расчетных исследований. Практика создания образцов новой техники в сегодняшних условиях показывает, что необходимо изменение традиционного соотношения для эксперимента и расчета в проектировании в пользу последнего.

Ранние экспериментальные [1, 2] и теоретические [2 - 4] исследования обтекания тел вблизи границы раздела сред связаны с развитием воздушного и водного видов транспорта. В основном они ограничивались исследованием гидродинамики крыла, как основного средства управления и поддержки транспортного аппарата. В связи с проектированием аппаратов на динамических принципах поддержки появились работы по методу дискретных вихрей [4], особенностей [5], сращиваемых асимптотических разложений, квадрупольной теории крыла, потенциалу ускорений [6]. Эти подходы основывались на разного рода допущениях, что упрощало задачу, но не всегда в полной мере отражало особенности явлений. При экспериментальном исследовании пришлось столкнуться с рядом трудностей моделирования движения тела вблизи экрана, так как в аэродинамической трубе тяжело выполнить отображение реальных условий обтекания.

Исследования по аэродинамике наземных транспортных средств имели в основном эмпирический характер. Теоретические подходы не нашли широкого применения, так как они позволяли изучать процессы обтекания лишь для тел простейшей геометрии. Поэтому математические и

экспериментальные исследования процессов обтекания транспортных аппаратов стали особенно актуальными. Применение математического моделирования дает возможность изучения механизма таких явлений, которые в физическом эксперименте иногда скрыты от исследователя. Особенно его значение повысилось с развитием персональных ЭВМ, усовершенствованием используемых моделей и численных методов. Дополняя друг друга и конкурируя между собой, расчет и эксперимент предоставляют исследователям новые возможности по изучению и расчету сложных взаимосвязанных процессов.

В настоящей работе рассмотрены результаты численного и экспериментального моделирования обтекания элементов несущих систем вблизи экрана. При расчетах использовались метод дискретных вихрей и уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Представлены результаты исследования обтекания цилиндра, профиля и автомобиля вблизи экрана.

2. *Экспериментальное исследование обтекания профиля вблизи экрана.* В аэродинамической трубе Т-3 Харьковского авиационного института замкнутого типа, с открытой рабочей частью, методом зеркального отображения исследовались особенности обтекания и аэродинамические характеристики крыльевого профиля CLARK-Y-4% для малых расстояний до экрана. Целью выполненных экспериментов было изучение процессов обтекания тел вблизи экрана, а также получения данных для тестирования разработанных численных методик.

Аэродинамические характеристики получены для относительных расстояний $\bar{h}=0.016, 0.024, 0.032, 0.04, 0.052$ (где $\bar{h} = h/b$, h - расстояние до экрана, b - хорда профиля) и угла атаки $\alpha = -0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ, 1.0^\circ$.

Установлены зависимости коэффициента подъемной силы, лобового сопротивления, продольного момента и аэродинамического качества от угла атаки и расстояния до экрана (рис.1).

Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение угла атаки ведет к увеличению подъемной силы. Уменьшение расстояния до экрана характеризуется ростом коэффициента подъемной силы. При приближении профиля к экрану лобовое сопротивление возрастает. При отрицательных углах атаки на профиль действует отрицательная подъемная сила, прижимающая его к земле. Производная $\partial C_m / \partial \alpha$ имеет отрицательное значение в исследованном диапазоне расстояний до экрана и углов атаки. Это свидетельствует о наличии продольной устойчивости. Приближение профиля к экрану приводит к расширению области повышенного давления на его нижней поверхности. В результате продольный момент растет.

Визуализация течения в районе передней кромки профиля показала, что в исследованном диапазоне расстояний до экрана и углов атаки отрыв течения не происходит.

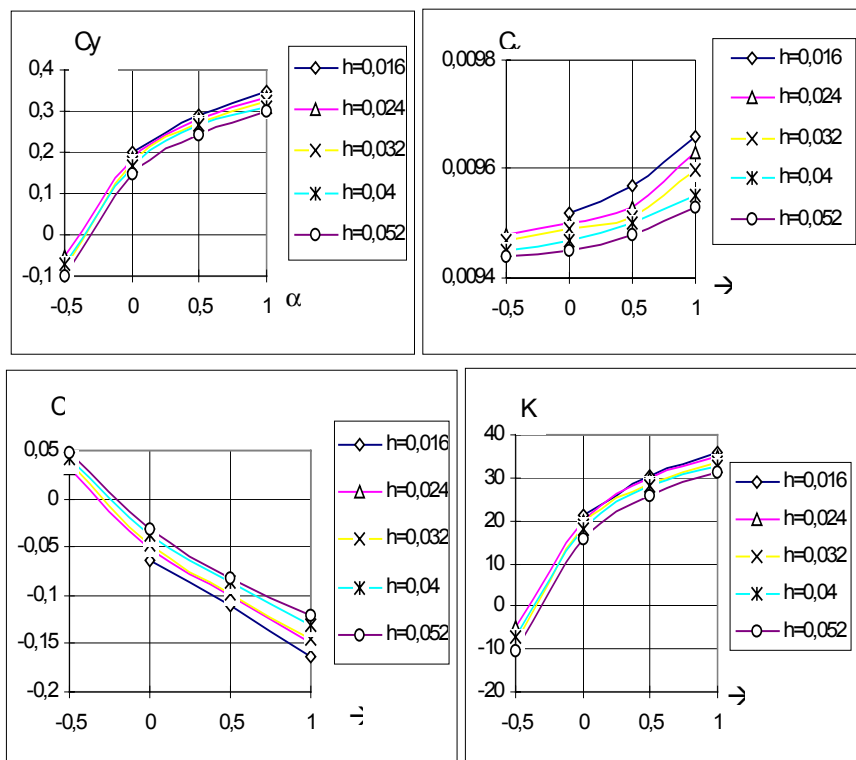


Рис. 1. Зависимость коэффициентов подъемной силы, лобового сопротивления, момента тангажа и аэродинамического качества профиля CLARK-Y-4% от угла атаки

3. *Исследования обтекание профиля вблизи экрана методом дискретных вихрей.* С математической точки зрения течения вблизи экрана представляют собой широкое поле для построения моделей и методов, описывающих многообразие явлений и физических эффектов. В настоящее время при исследовании многих физических явлений все более активно ставится проблема установления границ применимости и верификации использованных математических моделей и численных методов. Разработка и использование простых математических моделей, которые с удовлетворительной точностью позволяют изучать сложные физические явления, является актуальной задачей.

При использовании модели идеальной несжимаемой жидкости в настоящей работе в основу разработанных алгоритмов положено дискретно-вихревой подход, развиваемый в работах [7, 8]. Рассчитаны течения около профиля, расположенного вблизи поверхности экрана, характеризующиеся большими числами Рейнольдса, в которых влияние вязкости существенно только в тонких слоях, а в основной области течения вязкостью можно пренебречь. Математическое моделирование обтекания сводилось к определению значений циркуляций дискретных вихрей около основного и зеркально отображенного профиля, по которым рассчитывалась величина скорости и давление в любой точке плоскости вне обтекаемого профиля и

непосредственно на его поверхности. Аэродинамические коэффициенты определялись путем интегрирования распределения давления по поверхности профиля.

На основе разработанной методики, реализованного алгоритма и программы были проведены численные расчеты обтекания профилей CLARK-Y и CLARK-YH для случая безграничного обтекания и вблизи экрана. Исследовано влияние расстояния до экрана и угла установки профиля на точность расчета аэродинамических характеристик (рис. 2). Выполнен анализ и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [2].

4. Численное моделирование околоэкранных течений на основе уравнений Навье-Стокса. В последнее время в теоретических исследованиях многих физических явлений все большее распространение получают модели и численные методы на основе уравнений Навье-Стокса. Основные проблемы численного решения уравнений Навье-Стокса связаны с их записью в адаптивной криволинейной неортогональной системе координат, построением расчетной сетки, выбором разностной аппроксимации исходных уравнений, заданием граничных условий, расчетом поля

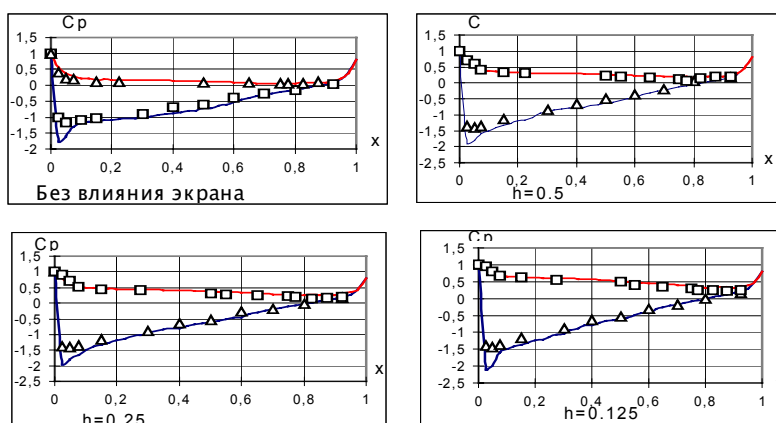


Рис. 2. Распределение коэффициента давления крылевого профиля вблизи экрана : эксперимент / \square / Δ -нижняя и \square -верхняя поверхности, сплошная кривая - расчет МДВ

давления, тестированием разработанных алгоритмов, а также оценкой влияния схемных эффектов.

При постановке задачи численного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости на основе уравнений Навье-Стокса для ламинарного и турбулентного режимов были использованы физические переменные и переменные завихренности - функция тока. Для замыкания осредненных уравнений Навье-Стокса использована двухпараметрическая ($k - \epsilon$) модель турбулентности [8].

Разработаны методики построения сетки на основе алгебраических соотношений и решения дифференциальных уравнений [9, 10]. На рис. 3 показаны примеры построения сеток для исследования обтекания цилиндра вблизи экрана и автомобиля.

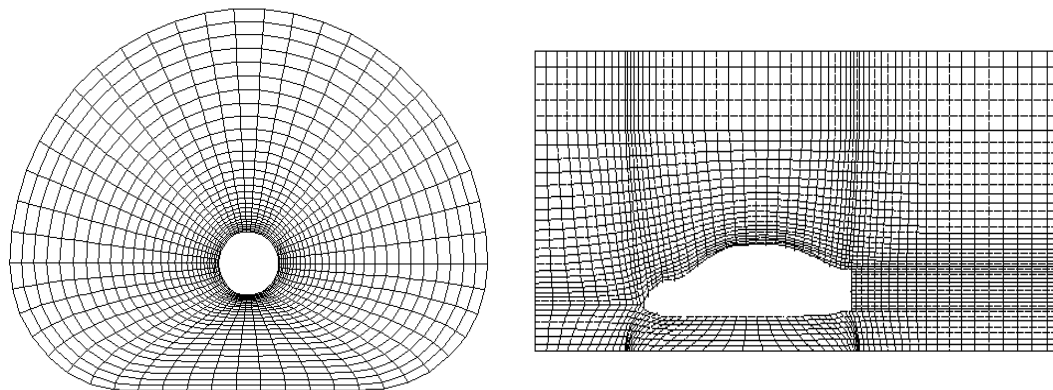


Рис. 3. Расчетная сетка для цилиндра и автомобиля вблизи экрана

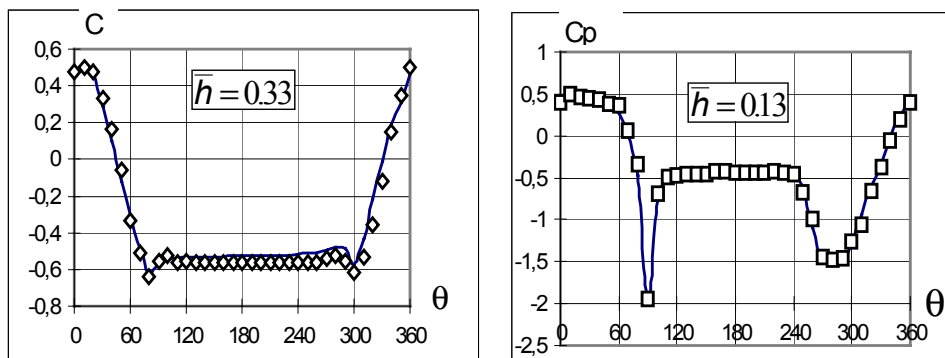
Наиболее важным этапом при численном моделировании на основе решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с помощью конечно-разностных методов является выбор алгоритма преобразования исходных уравнений в частных производных в систему алгебраических уравнений. Были разработаны методики, алгоритмы и программы решения уравнений Навье-Стокса, записанных в криволинейной неортогональной системе координат с использованием следующих схем: противопоточной, гибридной, Леонардо второго и третьего порядка аппроксимации, верхней релаксации, предиктор-корректор с расщеплением по времени, методом переменных направлений и матричной факторизации.

При решении уравнений Навье-Стокса несжимаемой вязкой жидкости в переменных завихренность - функция тока одна из проблем связана с расчетом поля давления по известному полю скоростей или функции тока. Были рассмотрены возможные подходы к расчету поля давления, разработаны и реализованы четыре методики определения поля давления в криволинейной неортогональной системе координат с помощью уравнений Пуассона для давления и переменной Бернулли [11], прямого интегрирования уравнений количества движения, методики SIMPLER [12].

Граничные условия на обтекаемых поверхностях и экране реализованы с помощью нескольких методик [13-15].

Тестирование разработанных методик численного решения уравнений Навье-Стокса выполнено на задаче о развитии ламинарного течения жидкости в каверне и при обтекании изолированного цилиндра. Для турбулентного режима было рассчитано обтекания пластины и цилиндра.

Все разработанные методики были реализованы в интегрированном пакете прикладных программ. Ниже представлены некоторые результаты исследования обтекания элементов несущих систем вблизи экрана : кругового цилиндра, крыльцевого профиля и автомобиля. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и расчетами других авторов для профиля и автомобиля [16 - 19] показано на рис. 4-6.



P

ис. 4. Распределение давления на цилиндре вблизи экрана :
 -- расчет, \diamond - эксперимент /16-17/

При обтекании цилиндра вблизи экрана в следе образуются два несимметричных вихря, при этом верхний имеет более правильную форму и большие размеры, чем нижний. Это связано с наличием щелевого эффекта в месте минимального зазора между цилиндром и экраном. Скорость за цилиндром у поверхности экрана имеет значительно большую величину, чем в невозмущенном набегающем потоке. Поэтому часть жидкости, попадая в этот участок течения, выносится из донной области нижней части цилиндра. Передняя и задняя критические точки смещаются к экрану. Незначительные перемещения точек отрыва объясняются стабилизирующим влиянием экрана на аэродинамический след. Экран тормозит поперечное движение вихревых сгустков в непосредственной близости за цилиндром и таким образом стабилизирует место положения точек отрыва.

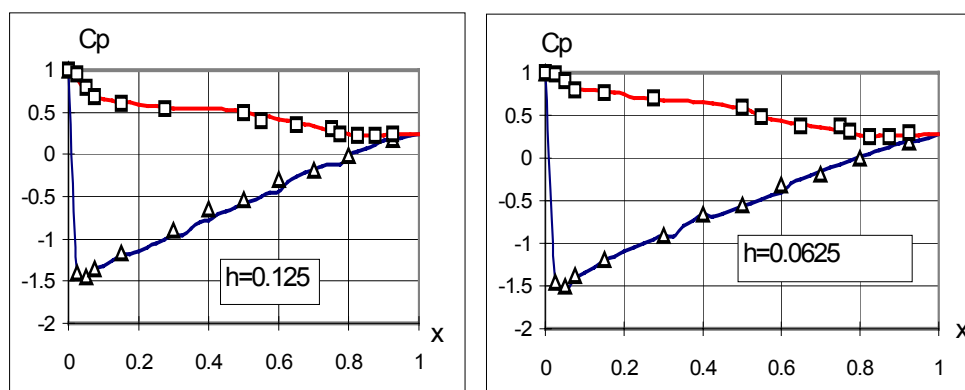


Рис. 5. Распределение коэффициента давления на крыльевом профиле вблизи экрана : эксперимент [2], Δ -нижняя и \circ -верхняя поверхности, сплошная кривая - расчет

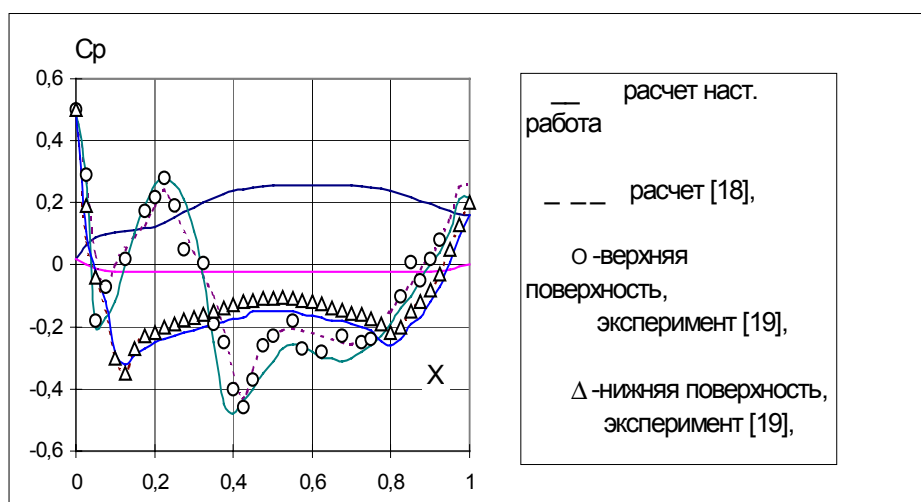


Рис. 6 Распределение давления на поверхности автомобиля

5. *Выводы.* В работе экспериментально и численно исследованы особенности обтекание элементов транспортных систем вблизи экрана. При расчетах использованы метод дискретных вихрей и уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости для ламинарного и турбулентного режимов течений. Представлены результаты исследования обтекания цилиндра, профиля и автомобиля вблизи экрана. Получены зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки и расстояния до экрана.

Сбалансированное сочетание расчетов и экспериментов в аэродинамических трубах может привести к значительной экономии времени и средств, затрачиваемых на разработку новых транспортных средств. Построенные численные модели, реализованные алгоритмы и программы могут быть использованы при проектировании транспортных средств, а также для усовершенствования моделей и методов механики жидкости и газа.

Библиографические ссылки

1. Гордон М.Г. Экспериментальное исследование поля скоростей и давлений вокруг профиля вблизи земли // Труды ЦАГИ. -1965.- Вып. 974. - 24 с.
2. Серебрянский Я.М., Бячурев Ш.А. Исследование в трубе горизонтально установившегося движения крыла на небольшом расстоянии от земли // Труды ЦАГИ.- Вып. 437.- 1939. - 32 с.
3. Ермоленко С.Д., Рогозин Ю.А., Рогачев Г.В. К расчету аэродинамических характеристик прямоугольного крыла с концевыми шайбами вблизи экрана // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1975. - №2 - С. 168-171.
4. Басин М.А., Шадрин В.П. Гидроаэродинамика крыла вблизи раздела сред.- Л.: Судостроение, 1980. - 304 с.

5. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. - М.: Наука, 1978.-276 с.
6. Панченков А.Н. Асимптотические методы в механике. - Новосибирск : Наука СО АН СССР, 1983. -176с.
7. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел. -М.: Наука, 1988.-232 с.
8. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов методом дискретных вихрей. - М.: Изд. фирма физ.-мат. литературы, 1995. - 368 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости. В 2 - х томах. - М.: Мир, 1991.- Т. 1. - 501с.- Т. 2. - 552 с.
10. Томас П.Д., Миддлкоф Д.Б. Прямое управление распределением узловых точек в сетках, порождаемых решением эллиптических уравнений // РТК. -1980.- Т. 18, № 7.- С.55- 62.
11. Приходько А.А., Сохацкий А.В. Математическое и экспериментальное моделирование аэродинамики элементов транспортных систем вблизи экрана // Днепропетровск : Наука и образование, 1998. - 160 с.
12. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. - М.: Судостроение, 1989.- 256 с.
13. Захаренков М.Н. Аппроксимация граничного условия для завихренности на поверхности твердого тела при решении уравнений Навье-Стокса в переменных функция тока и завихренность // Численные методы механики сплошной среды. - Новосибирск.- 1980.- Т.11, N 7.- С. 56-74.
14. Роуч П. Вычислительная гидродинамика.-М.: Мир, 1980.-616 с.
15. Сохацкий А.В. Застосування к-е моделі турбулентності для розрахунку обтікання колового циліндру // Труды VII Международного симпозиума “Методы дискретных особенностей в задачах математической физики”- Феодосия-Москва: Харьковский гос. университет (Украина), Институт математики НАН Украины, ГосНИЦ ЦАГИ (Россия), ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского (Россия), Херсонский гос. тех. университет (Украина).- 1997.-С.143-146.
16. Коваленко В.М., Бычкова Н.М., Кисель Г.А., Диковская Н.Д. Обтекание вращающегося и неподвижного цилиндра вблизи плоского экрана. Сообщение 1 // Изв. СО АН СССР. Сер. тех. наук.- 1983.- №13, вып. 3.- С.50-59.
17. Коваленко В.М., Бычкова Н.М., Кисель Г.А., Диковская Н.Д. Обтекание вращающегося и неподвижного цилиндра вблизи плоского экрана. Сообщение 2 // Изв. СО АН СССР. Сер. тех. наук.- 1984.- №4, вып. 1.-С.78-88.
18. Хиршель Э., Кордулла В. Сдвиговое течение сжимаемой жидкости. Численный расчет пограничного слоя. - М.: Мир, 1987. - 248с.
19. Hirschhel E.H., Bretthauer H., Rohe H. Theoretical and experimental boundary - layer studies on car bodies// J. Internat. Association for vehicle design.- 1984.- №5.-PP.567-584.

Поступила в редколлегию

Mathematical and Experimental Simulation of Lifting System lements in Ground Proximity

A. Prykhodko, A. Sokhatsky

Physical and mathematical body flow simulation in the ground proximity is considered. The complex approach based on a discrete vortex method and non-stationary Navier-Stokes equations for laminar and turbulent flow regimes with the use of curvilinear non-orthogonal coordinate system is applied.

Efficient numerical techniques and algorithms for hydroaerodynamic calculations with the use of a variety of schemes for the inviscid Navier-Stokes equation approximation are constructed and realized.

The results of experimental investigation and numerical simulation of the nearground flows by way of example of flow past a circular cylinder, an airfoil, a car and a separated flow in the wind tunnel are given.