

**УДК 629.7.016**

**ББК 39.5**

**В909**

**Ю. Ф. Вшивков**

**Иркутск, Россия**

**Е. А. Галушко**

**Иркутск, Россия**

**С. М. Кривель**

**Иркутск, Россия**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЁТА  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS**

В статье приводятся основные результаты оценки достоверности расчёта аэродинамических характеристик несущей системы вблизи подстилающей поверхности. Оценка выполнена на основе сопоставления результатов расчёта с экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов с использованием альтернативных методик.

**Ключевые слова:** аэродинамические характеристики; экраноплан.

**UDC 629.7.016**

**ВБК 39.5**

**Y. F. Vshivkov**

**Irkutsk, Russia**

**E. A. Galushko**

**Irkutsk, Russia**

**S. M. Krivel'**

**Irkutsk, Russia**

# COMPREHENSIVE RELIABILITY ASSESSMENT OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS COMPUTED WITH ANSYS FOR COMPOUND OBJECTS

The article presents the main assessment results of calculating reliability of aerodynamic characteristics of a support system near the underlying surface. The assessment is based on comparing the calculation results with the experimental data and the results obtained by other authors using alternative methods.

**Key words:** aerodynamic characteristics; a WIG vehicle.

Вычислительная аэродинамика в настоящее время интенсивно внедряется в практику аэродинамического проектирования благодаря бурному развитию компьютерных технологий. Одним из общепризнанных лидеров в этой области является программный пакет конечно-элементного анализа ANSYS Inc.

Пакет ANSYS является обширной и сложной CAD или CFD системой, ориентированной на решение широчайшего круга задач конечно-элементного анализа. Его приложение к конкретным практическим задачам требует серьезного анализа результатов моделирования на предмет достоверности и применимости результатов. Настоящая работа посвящена оценке достоверности расчёта аэродинамических характеристик экраноплана с использованием ANSYS CFX и ANSYS FLUENT, проведению методических исследований по выбору параметров программ ANSYS для расчёта, определению допустимых кинематических параметров обтекания (области применимости пакета программ). Существенной особенностью работы является предмет её исследования – экраноплан (несущая система экраноплана) с реализацией на некоторых режимах отрывного обтекания с интенсивным вихреобразованием.

Для оценки достоверности были выбраны экспериментальные данные работы [Барщев, Андреев, Холявко, Усик, 1978, с. 80]. Эта работа была выполнена специально для оценки достоверности различных методов расчёта аэродинамических характеристик, в частности, метода дискретных вихрей. Исследуе-

мое тело представляет собой крыло квадратной формы с тонким симметричным профилем (рис. 1).

Такая форма крыла предполагает наличие мощных, оказывающих значительное влияние на аэродинамические характеристики, перетеканий через боковые кромки и отрыв потока с передней кромки крыла уже на относительно небольших углах атаки.

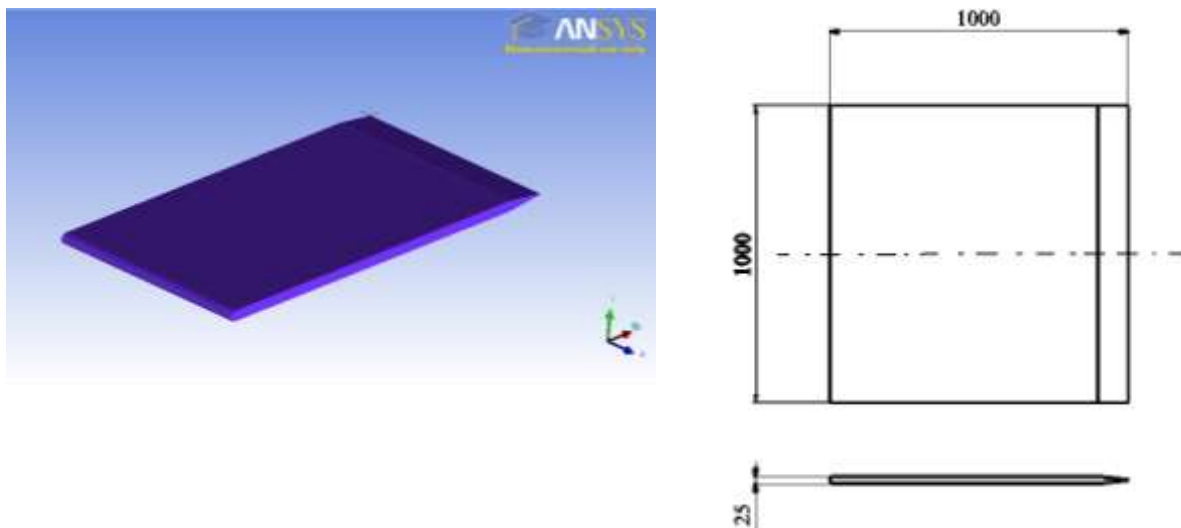
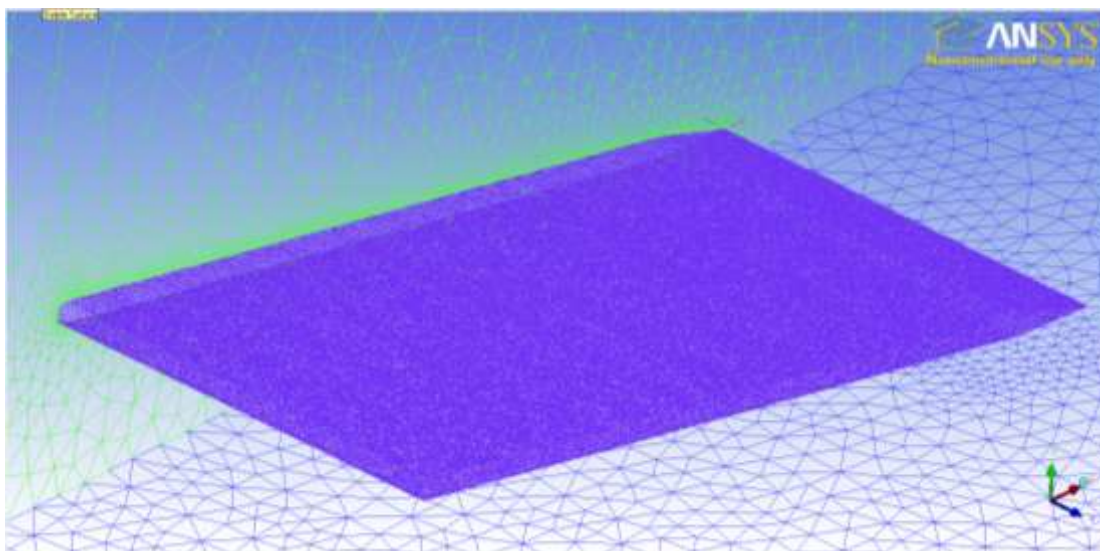


Рис. 1. Модель крыла малого удлинения

Задание геометрии и построение сетки модели производились в ANSYS IceмCFD, расчёт выполнялся в ANSYS FLUENT, а для создания визуализации обтекания, полей давления и скоростей использовался ANSYS CFDPost. Исследуемая 3D модель была помещена в специально смоделированное ограниченное пространство в виде канала прямоугольного сечения (математический аналог аэродинамической трубы). Начало и конец этой трубы являлись, соответственно, входом и выходом потока. Расчёты выполнялись для всего спектра расчётных сеток, представляемых ANSYS. Максимальное число конечных элементов достигало примерно 2...3 миллиона (рис. 2). Материальное тело – AIR (воздух). В качестве модели турбулентности была выбрана  $k$ - $\epsilon$ -модель (кинетическая энергия турбулентности  $k$  и скорость её диссипации  $\epsilon$ ). Скорость невозмущенного потока задавалась реальной из условий эксперимента (40 м/с).



*Рис. 2.* Расчётная сетка модели

В работе [Барщев, Андреев, Холявко, Усик, 1978, с. 80] экран моделировался при помощи зеркально-отображенных моделей крыльев, которые с помощью специального устройства крепились к ферме аэродинамических весов и при изменении угла атаки основного крыла синхронно поворачивались на зеркально-отображенный угол при сохранении заданного зазора между кромками схода.

ANSYS предлагает наиболее корректный метод моделирования экрана – подвижный экран. Это обеспечивается заданием на экране граничного условия подвижной стенки (movingwall). В этом типе граничного условия стенка движется со скоростью невозмущенного потока. Проводились расчёты для всего спектра возможностей ANSYS по заданию поверхности экрана (экран задавался как: стенка трубы с реальными свойствами и идеальная стенка трубы без трения воздушной среды).

Следует отметить, что на создание сетки и на сам расчёт для компьютера с процессором AMD Phenom II X6 1090T (6 ядер), оперативной памятью 8 Гб и операционной системой Windows 7 64-bit SP1, требуется, в среднем, около 1 ч 30 мин.

Пример сопоставления результатов расчёта и экспериментальных данных приведен на рис. 3, 4, 5, 6.

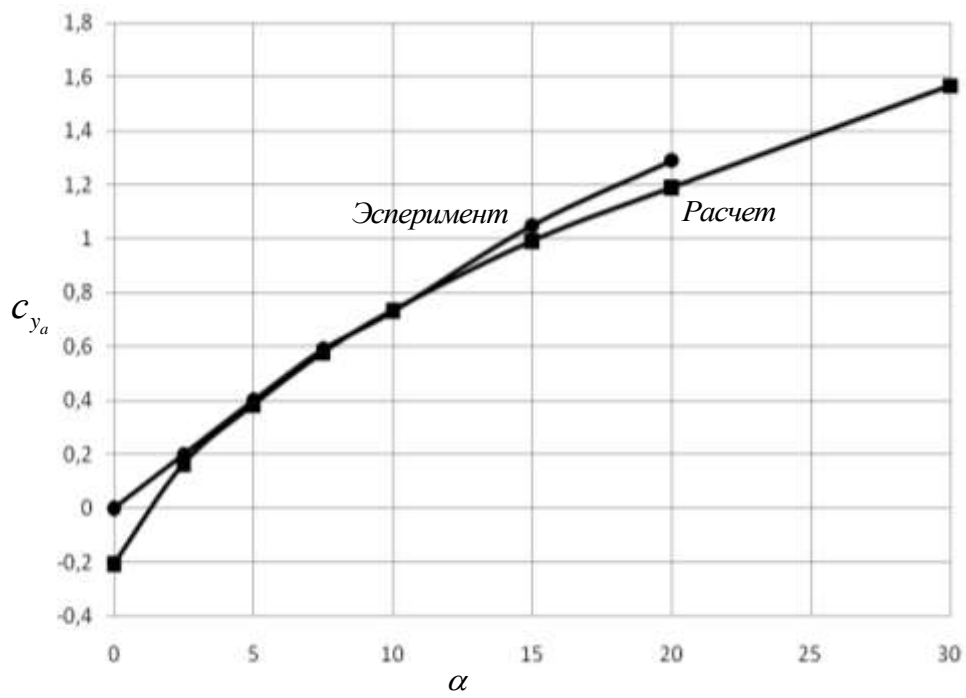


Рис. 3. Зависимость коэффициента подъёмной силы  $c_{y_a}$  от угла атаки  $\alpha$  при относительном отстоянии от поверхности раздела  $h=0,05$

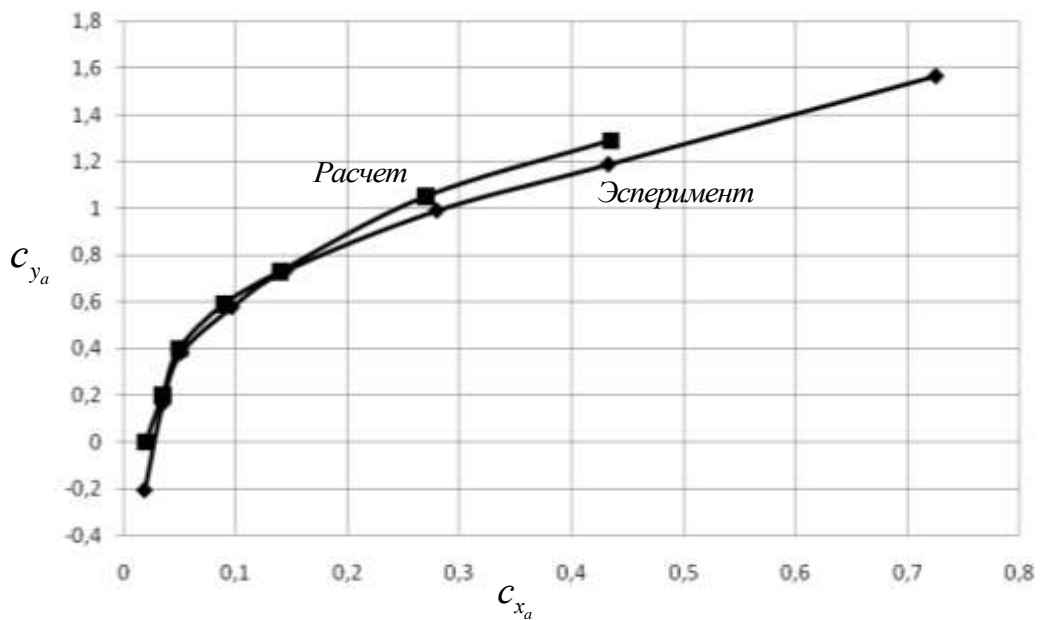


Рис. 4. Поляра крыла при относительном отстоянии от поверхности раздела  $h=0,05$

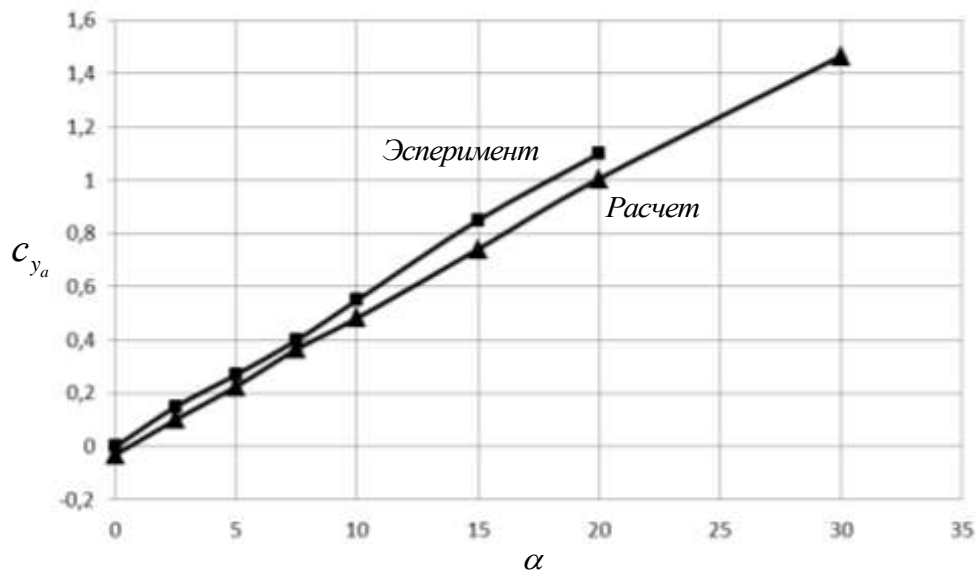


Рис. 5. Зависимость коэффициента подъёмной силы  $c_{y_a}$  от угла атаки  $\alpha$  при относительном отстоянии от поверхности раздела  $h=0,2$

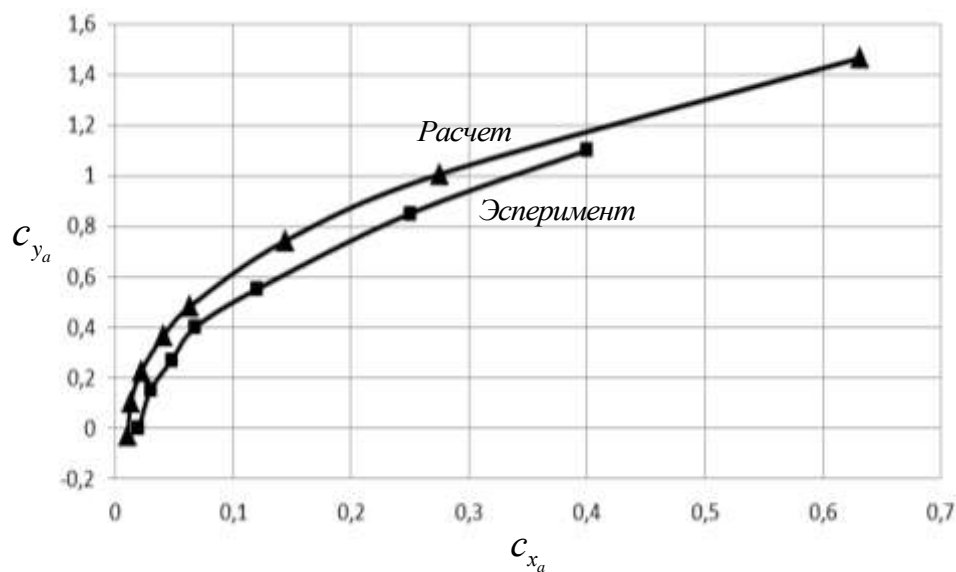
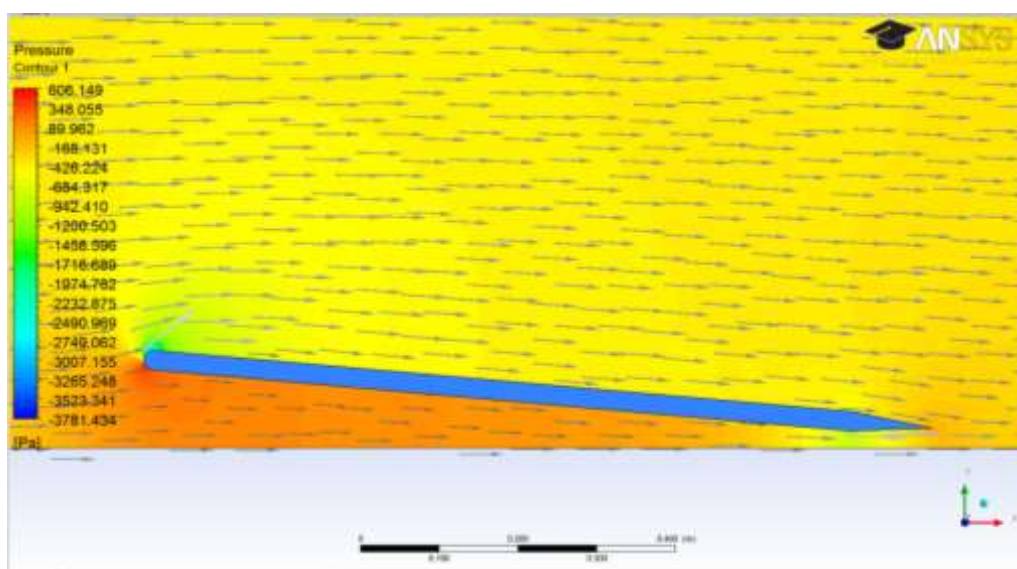


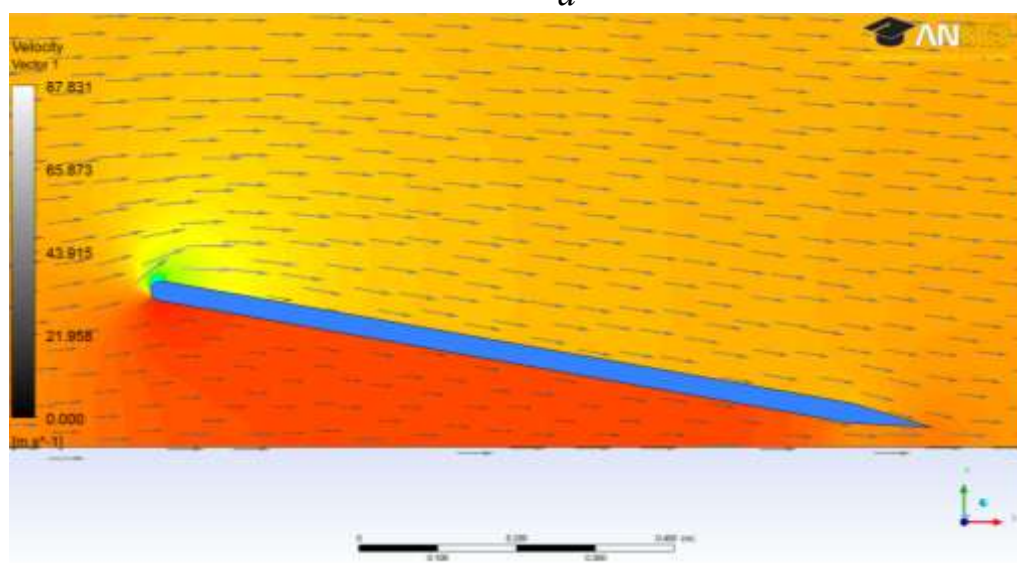
Рис. 6. Поляра крыла при относительном отстоянии от поверхности раздела  $h=0,2$

Следует обратить внимание, что при общем удовлетворительном совпадении результатов расчёта, существует существенное качественное расхождение при нулевом угле атаки  $\alpha$  по значению коэффициента подъёмной силы  $c_{y_a}$ . Данный вопрос подвергся самому серьёзному изучению и явился одним из

примеров преимущества применения ANSYS даже в сравнении с физическим экспериментом. Моделирование экрана подвижной поверхностью с достаточно полным описанием реального взаимодействия воздуха и экрана позволило описать известные и подтвержденные специальными исследованиями эффекты взаимодействия экрана и несущей системы. В качестве примера на рис.7 показано наличие зоны разряжения в окрестности задней кромки на угле атаки 5 градусов и отсутствие этой зоны при дальнейшем увеличении угла атаки. Причина состоит в изменении формы канала в окрестности задней кромки и поджатие струек.



*a*



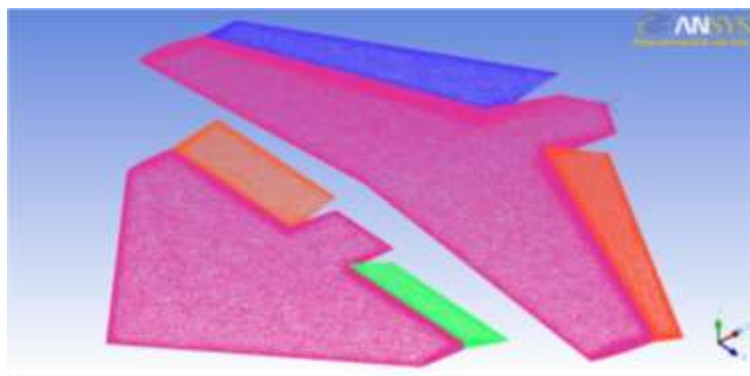
*б*

Рис. 7. Поле местных скоростей и давлений в плоскости симметрии крыла:

*a* – угол атаки  $\alpha = 5$  градусов; *б* – угол атаки  $\alpha = 10$  градусов



Переход к моделированию обтекания более сложных компоновок так же требует постоянного или промежуточного контроля достоверности результатов (качественного и количественного). Так, высокая инженерная ответственность исследования, представленная на рис.8 несущей системы экраноплана, потребовала проведения специальных, достаточно сложных экспериментальных работ.



*Рис. 8.* Несущая система экраноплана схемы тандем

Было выполнено три комплекса экспериментальных работ: параметрические исследования компоновки; визуализация обтекания; исследования распределенных аэродинамических характеристик.

Проведены параметрические экспериментальные исследования компоновки экраноплана с целью получения аэродинамических характеристик и выбора оптимальных (рациональных) параметров аэродинамической компоновки [Акулов, Курганский, Кривель, 2009, с. 256]. Наибольший интерес представляют экспериментальные данные визуализации обтекания исследуемой компоновки в вертикальной гидродинамической трубе [Горяинов, Заволженский, Кривель, 2008, с. 568] и исследование распределенных по поверхности компоновки местных давлений (коэффициентов давления).

Вертикальная гидродинамическая труба (рис.9) позволяет визуализировать обтекание модели методом красок или водородных пузырьков. Метод водородных пузырьков заключается в следующем. Экспериментальная модель исполняется из диэлектрического материала с выводом электропроводящих элементов в местах, где необходимо организовать выход мельчайших пузырьков водо-



рода. Обычно это передние, задние и боковые кромки несущих поверхностей. За счет организованной разницы потенциалов импульсного постоянного тока между моделью и корпусом трубы явление электролиза воды приводит к образованию поверхностей водородных пузырьков, движущихся вместе с жидкостью. Скорость всплытия мелких пузырьков пренебрежимо мала. Использование различных способов организованных подсветок и использование фото- и видеофиксации позволяет изучать и документировать особенности обтекания (в том числе, с интенсивным вихреобразованием) различных неподвижных и подвижных объектов (рис.10).

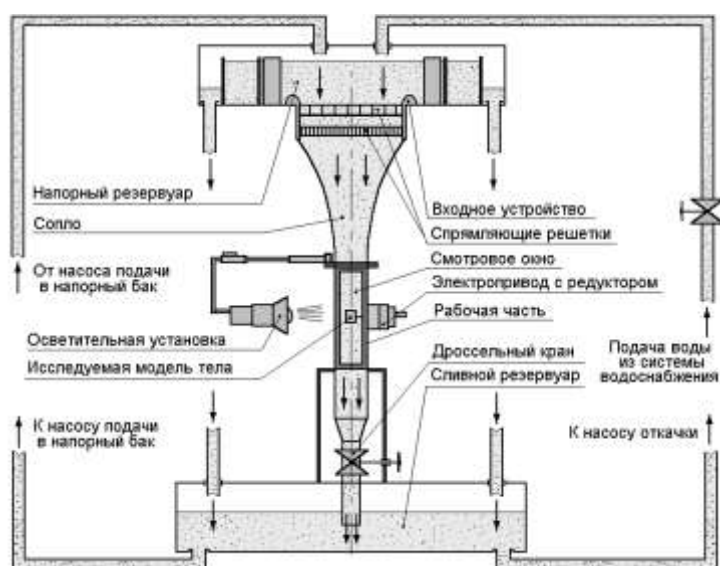


Рис. 9. Схема вертикальной гидродинамической трубы

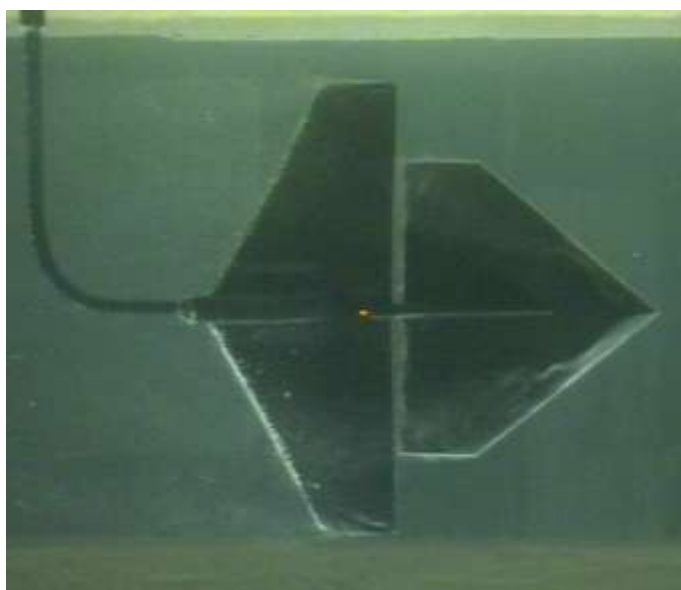
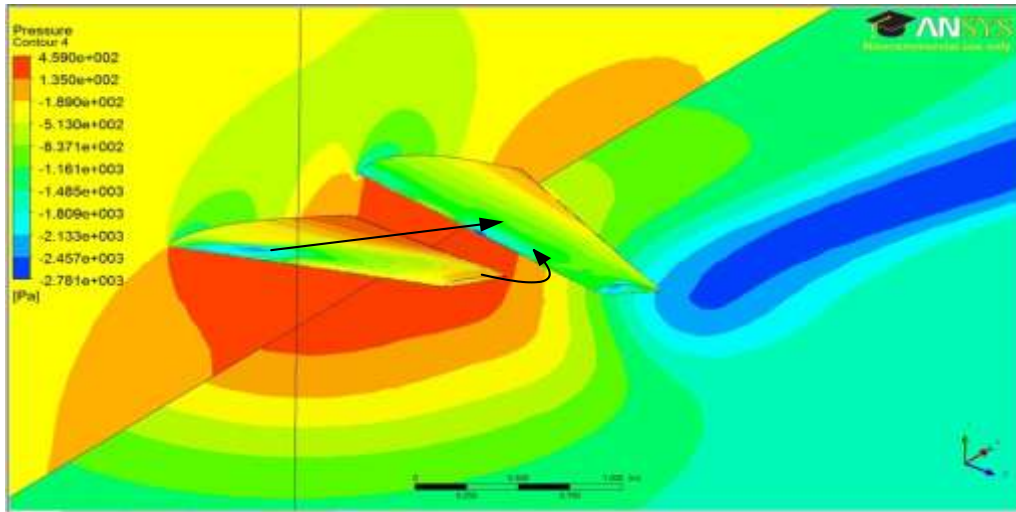
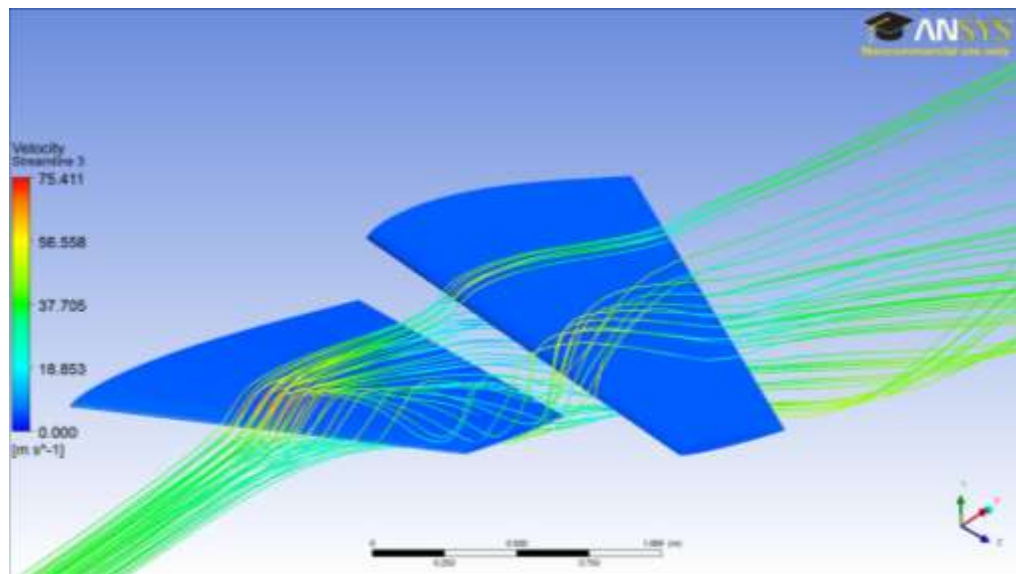


Рис. 10. Спектр обтекания несущей системы на виде в плане при угле атаки  $\alpha = 10$  градусов

На рис.11 представлены результаты расчётов, демонстрирующие совпадения с результатами описанного выше эксперимента. Метод сопоставления результатов расчётов с экспериментальными данными, безусловно, является самым надёжным методом оценки достоверности расчётов.



*А*



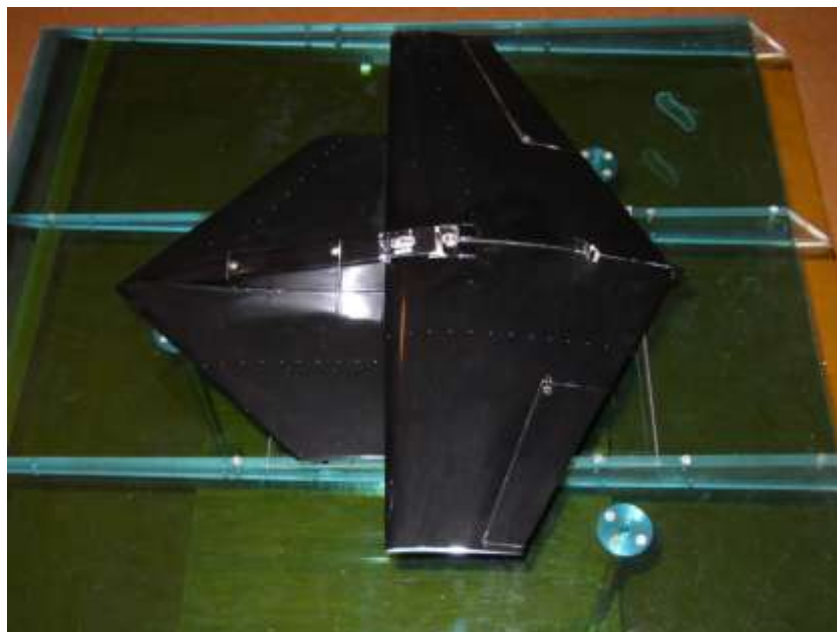
*б*

*Рис. 11.* Результаты расчёта для угла атаки  $\alpha = 10$  градусов:

*а* – спектр распределения местного давления по поверхности компоновки и трубы;

*б* – линии тока и схема образования вихревой пелены на передней несущей поверхности

В рамках настоящей работы была выполнена экспериментальная работа по исследованию распределенных по поверхности несущей системы местных давлений. Поверхность модели дренирована (рис. 12). Измерение давления производится батарейным манометром высокой точности.



*Рис. 12.* Экспериментальная модель несущей системы с моделью экрана со сливом собственного пограничного слоя

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчётов позволило сделать вывод о высокой достоверности численного моделирования во всем диапазоне востребованных параметров расчёта (углов атаки и скольжения, отстояний от поверхности раздела, углов отклонения органов управления и т.д.). Полученные оценки достоверности результатов расчёта позволяют обеспечить высокую надежность исследований динамики движения, устойчивости и управляемости экраноплана [Вшивков, Галушко, Кривель, 2013, с. 522].

### **Библиографический список**

1. Акулов О.В., Курганский В.Г., Кривель С.М. Аэродинамическое проектирование экраноплана схемы «утка» оригинальной компоновки с обеспечением рациональных летно-технических и пилотажных характеристик / О. В.Акулов, В. Г. Курганский, С. М. Кривель // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России: сборник науч-

ных трудов по материалам 1-й Научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов. 6 ноября 2009 г. – Иркутск: ИФ МГТУ ГА, 2009. – 256 с.: ил.

2. *Барцев И.В.* Аэродинамические характеристики частей летательных аппаратов вблизи земли и в ограниченных потоках/ *И. В. Барцев* [и др.] //Влияние формы в плане на аэродинамические характеристики крыла малого удлинения в ограниченном потоке. Отчет по НИР, номер государственной регистрации 78075544. Ч. 2. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1978. 80 с.: ил.

3. *Вшивков Ю.Ф.* Синтез эффективной автоматической системы управления экранопланов / Ю. Ф. Вшивков, Е. А. Галушко, С. М. Кривель // Решетневские чтения: материалы 17 Международной научной конференции, посвященной памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (12...14 нояб. 2013 г., Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2013. Ч. 1. – 522 с.: ил.

4. *Горяинов А.М.* Опыт визуализации течений в гидродинамических исследованиях методами водородных пузырьков и красок / *А.М.Горяинов, А.Е.Заволженский, С.М.Кривель*// Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии: материалы 26 школы по когерентной оптике и голографии. Иркутск: Издательство «Папирус», 2008. 568 с.: ил.