

# Визуализация сверхзвукового обтекания тандема крыльев

Т.В. Константиновская<sup>1</sup>, В.Е. Борисов<sup>1</sup>, А.Е. Луцкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл., д. 4, Москва, 125047, Россия

## Аннотация

В работе представлены результаты анализа обтекания тандема крыльев сверхзвуковым потоком посредством методов научной визуализации. Рассматривались две конфигурации тандема, отличающихся друг от друга вертикальным расположением крыла-генератора относительно плоскости симметрии основного крыла. Данные получены в результате численных расчетов, проведенных с числом Маха набегающего потока  $M_\infty = 3$ . В модели использовались прямые крылья, прямоугольные в плане с острыми передней, боковой и задней кромками с одинаковой хордой и размахом основного крыла, превышающим размах крыла-генератора в два раза. Крыло-генератор было расположено под углом  $10^\circ$  градусов к набегающему потоку, основное крыло расположено под нулевым углом атаки. Моделирование проводилось на основе URANS уравнений с моделью турбулентности Спаларта-Аллараса (SA). Численные расчеты были проведены на гибридной суперкомпьютерной системе К-60 в ИИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Для научной визуализации результатов расчета применялся подход с использованием Лютекс (Liutex) критерия идентификации вихревых структур.

## Ключевые слова

Визуализация вихревых течений, сверхзвуковой концевой вихрь, идентификация вихря, тандем крыльев.

# Visualization of Supersonic Flow Around Wing Tandem

T.V. Konstantinovskaya<sup>1</sup>, V.E. Borisov<sup>1</sup>, A.E. Lutsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, Miusskaya sq. 4, Moscow, 125047, Russia

## Abstract

The paper presents the analysis results of the supersonic flow around a wings tandem using the methods of scientific visualization. Two tandem configurations were considered, differing from each other by the vertical position of the generator wing relative to the plane of symmetry of the main wing. The data are obtained as a result of numerical simulations carried out with the Mach number of the incoming flow  $M_\infty = 3$ . In the model the wings were straight, rectangular in plan with sharp front, side and trailing edges with the same chord and the span of the main wing exceeding the span of the generator wing by two times. The generator wing was located at an attack angle of  $10^\circ$  degrees to the incoming flow, the main wing is located at zero attack angle. The simulation was carried out on the basis of URANS equations with the Spalart-Allmaras (SA) turbulence model. Numerical calculations were carried out on the hybrid supercomputer system K-60 at the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS. An approach using the Liutex criterion for the vortex structures identification was applied for scientific visualization of the simulation results.

## Keywords

Vortex flow visualization, supersonic tip vortex, vortex visualization, wings tandem.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: konstantinovskaya.t.v@gmail.com (Т.В. Константиновская); narelen@gmail.com (В.Е. Борисов); allutsky@yandex.ru (А.Е. Луцкий)

ORCID: 0000-0002-1127-503X (Т.В. Константиновская); 0000-0003-4448-7474 (В.Е. Борисов); 0000-0002-4442-0571 (А.Е. Луцкий)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## 1. Введение

Одной из наиболее актуальных задач современной промышленности является создание высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) как для гражданской, так и военной авиации. Создание таких аппаратов сопряжено с многочисленными трудностями, преодоление которых требует детального изучения аэродинамики сверхзвуковых ЛА. В том числе интерес представляет исследование возникновения сверхзвуковых вихрей и их взаимодействия с поверхностями, как частный случай вихревых процессов, сопровождающих полет любого ЛА.

Для обработки и анализа результатов численного моделирования и натурных экспериментов повсеместно применяются специальные методы научной визуализации, развивающиеся совместно с вычислительными моделями [1 – 3] для вихревых течений. Так, например, помимо наглядного представления данных с их помощью можно определить положение вихревых зон и осей вихрей.

В данной работе представлены результаты анализа двух конфигураций тандема крыльев в сверхзвуковом потоке с использованием метода научной визуализации третьего поколения на основе Лютекс (Liutex) критерия идентификации вихревых течений [4 – 8]. Этот метод по построению свободен от влияния сдвиговых и сжимающих компонент тензора скоростей деформации, что является его преимуществом над классическими методами визуализации и анализа вихревых структур (такими как  $\lambda_2$  и  $Q$ -критерий). С точки зрения практических приложений изучение тандемных конфигураций играет важную роль, например, при проектировании горизонтального оперения высокоскоростных летательных аппаратов.

## 2. Постановка задачи

Исследовалось сверхзвуковое обтекание тандема крыльев (рисунок 1). Расчетная область представляла собой параллелепипед со сторонами  $L_x = 0.33$ ,  $L_y = 0.25$ ,  $L_z = 0.15$ . Число Маха набегающего потока было равно  $M_\infty = 3$ , число Рейнольдса равнялось  $Re_{L=1m} = 10^7$ .

Каждое крыло представляло собой прямое полукрыло, прямоугольное в плане, с острыми передней, концевой и задней кромками и имело ромбовидное основание с толщиной 13,3% от хорды. В безразмерных координатах крыло-генератор имело полуразмах  $l = 0.0475$ , а основное крыло – в два раза больше  $l = 0.095$ , хорда обоих крыльев  $b = 0.03$ . Расстояние между осями крыльев составляло 4 хорды крыла по потоку.

Рассматривались две конфигурации тандема крыльев (рисунок 2), отличающиеся вертикальным положением крыльев друг относительно друга (соотношение положения задней кромки крыла генератора и передней кромки основного крыла). Конфигурации подобраны таким образом, чтобы сходящийся с крыла-генератора концевой вихрь рассекался основным крылом так, чтобы его большая часть обтекала крыло {1} с одной стороны и {2} с другой.

## 3. Численная модель

Для описания трехмерного турбулентного течения сжимаемого газа использовалась система нестационарных осредненных по Рейнольдсу и Фавру уравнений Навье–Стокса (URANS). В качестве модели турбулентности использовалась однопараметрическая модель турбулентности Спаларта–Аллмараса (SA) в модификации для сжимаемых течений [9]. Начальные и граничные условия ставились стандартным образом [10].

Аппроксимация уравнений модели проводилась по пространству с помощью метода конечных объемов со схемой реконструкции TVD 2-го порядка точности. Предполагая, что расчетная область покрыта сеткой, состоящей из неперекрывающихся многогранных ячеек, метод конечных объемов реализуется интегрированием системы уравнений модели по каждой счетной ячейке с последующим преобразованием объемных интегралов от потоков в поверхностные интегралы по граням ячейки. Для вычисления невязких потоков на гранях расчетных ячеек использовался обобщенный метод С. К. Годунова с точным римановским

солвером. Для аппроксимации уравнений по времени применялись как явная, так и неявная (на основе метода LU-SGS) схемы. Используемый численный метод описан в [11].

Для численных расчетов использовался разработанный сотрудниками ИПМ им. М.В. Келдыша РАН программный комплекс ARES [12]. Расчеты проводились на гибридной суперкомпьютерной системе К-60 [13]. Для данной задачи использовались неструктурированные сетки, содержащие порядка 5 млн гексагональных ячеек для каждой из постановок. Расчетная область составляла 5 хорд крыла вниз по потоку от задней кромки основного крыла.

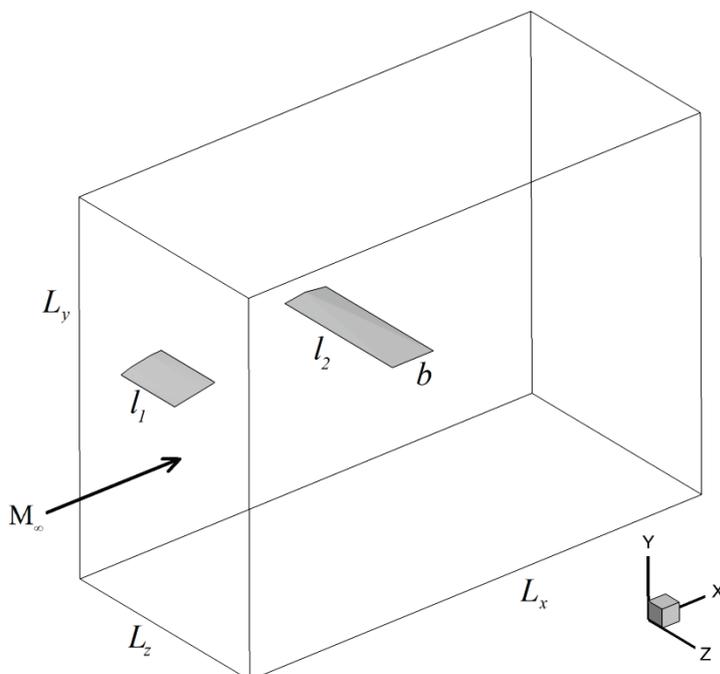


Рисунок 1 – Расчетная область

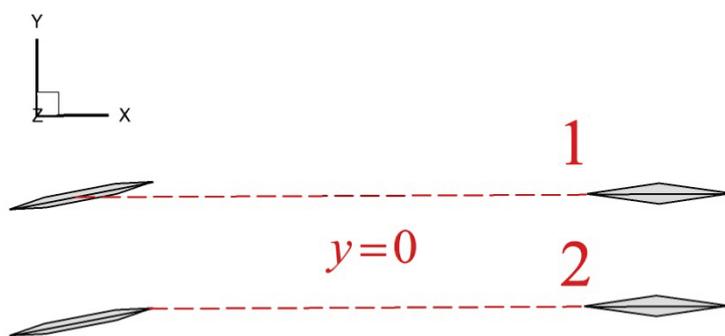


Рисунок 2 – Рассмотренные конфигурации тандема, схема

#### 4. Визуализация вихревых структур течения

Программный комплекс ARES содержит специальный модуль пост-процессинговой обработки для определения и анализа вихревых структур на гексагональных сетках. В его рамках реализованы некоторые классические методы научной визуализации, такие как  $\lambda_2$ ,  $Q$ -критерий и др [14, 15]. В последнюю версию модуля был также добавлен Лютекс (Liutex) метод научной визуализации – один из наиболее современных критериев идентификации вихревых структур. Модуль формирует выходные данные в формате пакета программ Tecplot.

В данной работе приводятся результаты, полученные с помощью Лютекс метода. Как показала практика, для ряда задач он позволяет получать значительно более лучшие результаты [16] в сравнении с классическими методами.

#### 4.1. Лютекс (Liutex) метод визуализации

Лютекс (Liutex) метод (критерий) идентификации и визуализации вихревых структур является одним из наиболее современных, он принадлежит к т.н. третьему поколению таких критериев. Этот метод свободен по своему построению от сдвиговых и сжимающих компонент тензора скоростей деформации [4], что уменьшает вероятность ложного определения вихревых структур. Он позволяет оценивать не только направление, но и силу вихря.

Метод был предложен в 2018 г. под названием Рортекс (Rortex) критерий [5], впоследствии он был переименован в Лютекс (Liutex) по имени одного из авторов [6].

Согласно этому критерию областью течения с вихревыми структурами считается та, в которой тензор скоростей деформации имеет одно действительное  $\lambda_r$  и два комплексно-сопряженных  $\lambda_{cr} \pm \lambda_{ci}$  собственных значения. С использованием этих собственных значений определяется Рортекс-вектор [7], локально совпадающий с осью вращения вихря как твердого тела:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{r}, \quad \mathbf{R} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r} - \sqrt{(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r})^2 - 4\lambda_{ci}^2},$$

где  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор завихренности,  $\mathbf{r}$  – нормированный собственный вектор, отвечающий  $\lambda_r$ , с условием  $\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r} > 0$ . На его основе формируется нормированная величина  $\overset{\circ}{\Omega}_R \in [0, 1]$ , показывающая интенсивность локального вращения среды:

$$\overset{\circ}{\Omega}_R = \frac{(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r})^2}{2 \left[ (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r})^2 - 2\lambda_{ci}^2 + 2\lambda_{cr}^2 + \lambda_r^2 \right] + \varepsilon_{Lu}}, \quad \varepsilon_{Lu} = k \max \{ \lambda_{ci}^2 \}.$$

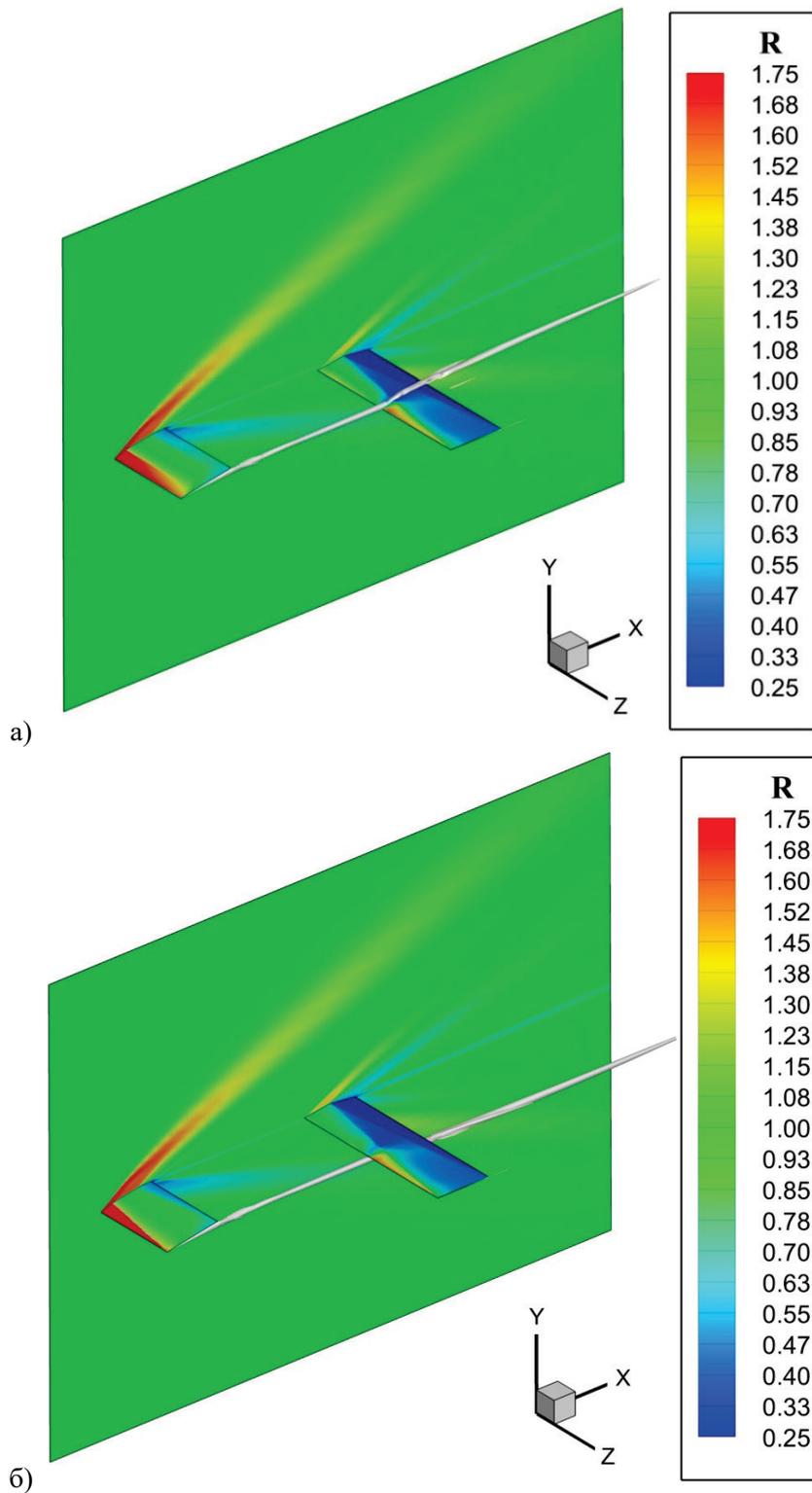
Здесь  $\varepsilon_{Lu}$  – величина, предназначенная для фильтрации численного «шума», максимум  $\lambda_{ci}$  берется по всей рассматриваемой области,  $k = 0.001 : 0.002$  [7, 8].

### 5. Результаты расчетов и визуализация

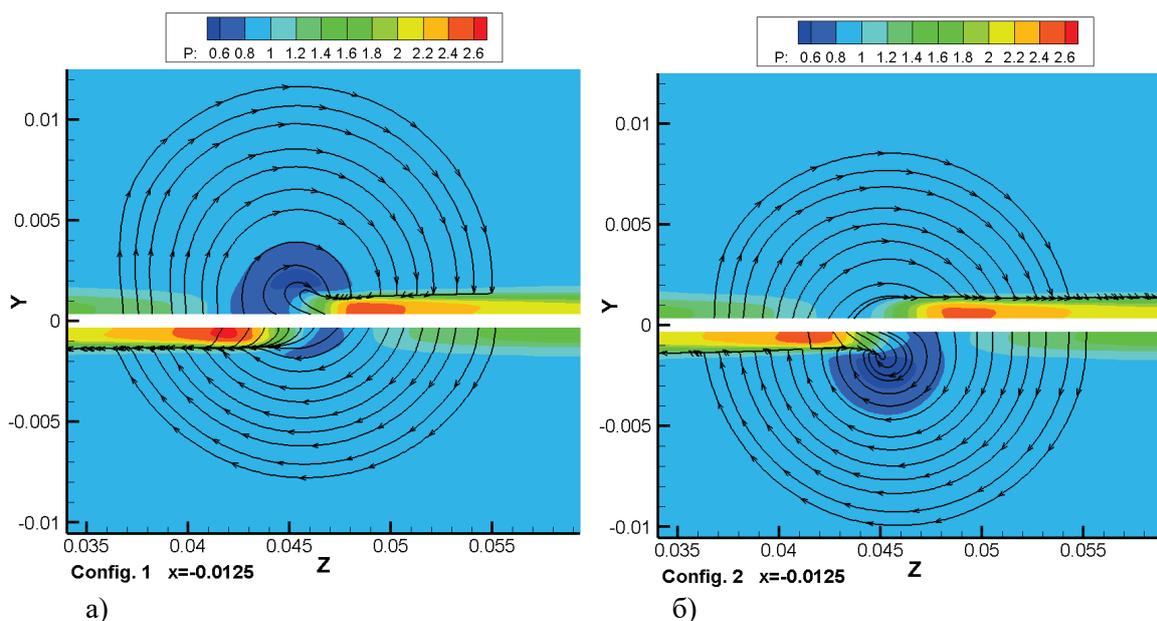
В этой части работы представлены полученные результаты численного исследования и визуализации сверхзвукового обтекания тандема крыльев (рисунок 3).

На рисунке 3 представлен общий вид течения для обеих конфигураций тандемов. Показано распределение поля плотности  $R$  на крыльях и плоскости симметрии, и показаны вихревые структуры изоповерхностью Лютекс-критерия  $\tilde{\Omega}_R = 0.59$ . Видно, что, в зависимости от конфигурации, основная часть вихря с крыла генератора, действительно, идет с разных сторон от основного крыла.

Более подробно начало взаимодействия концевой вихря и крыла можно наблюдать на рисунке 4, где показаны линии тока в поперечном сечении  $x = -0.0125$ , которое проходит через основное крыло вблизи его передней кромки.

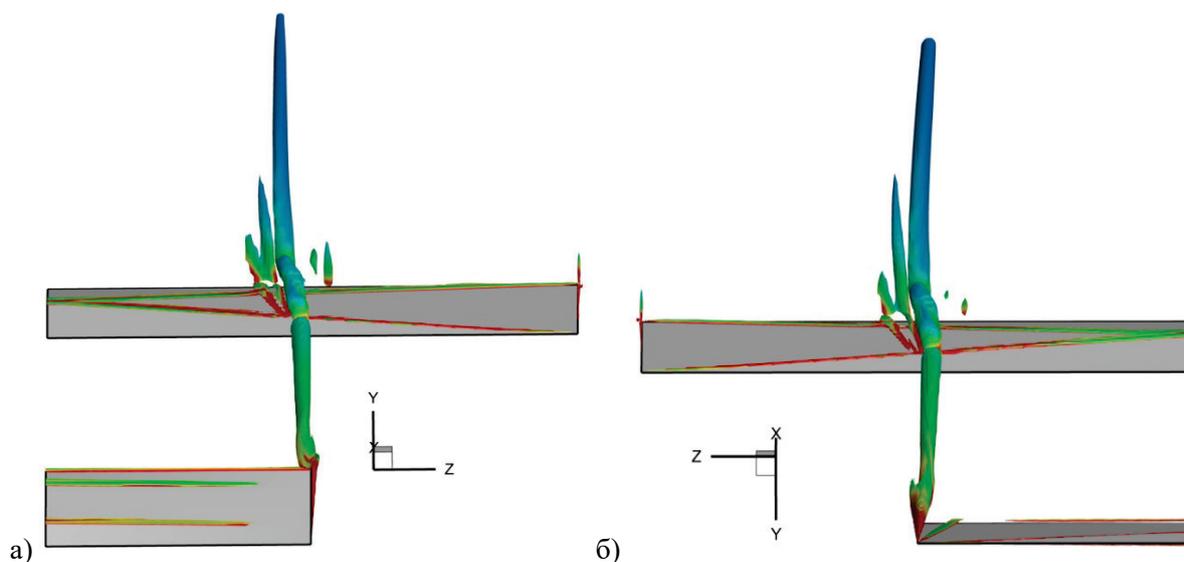


**Рисунок 3** – Распределения плотности  $R$  (а) на крыльях и плоскости симметрии и вихри, отображенные Лютекс критерием: изоповерхности  $\tilde{\Omega}_R = 0.59$ , для тандема1 (а) и тандема2 (б)



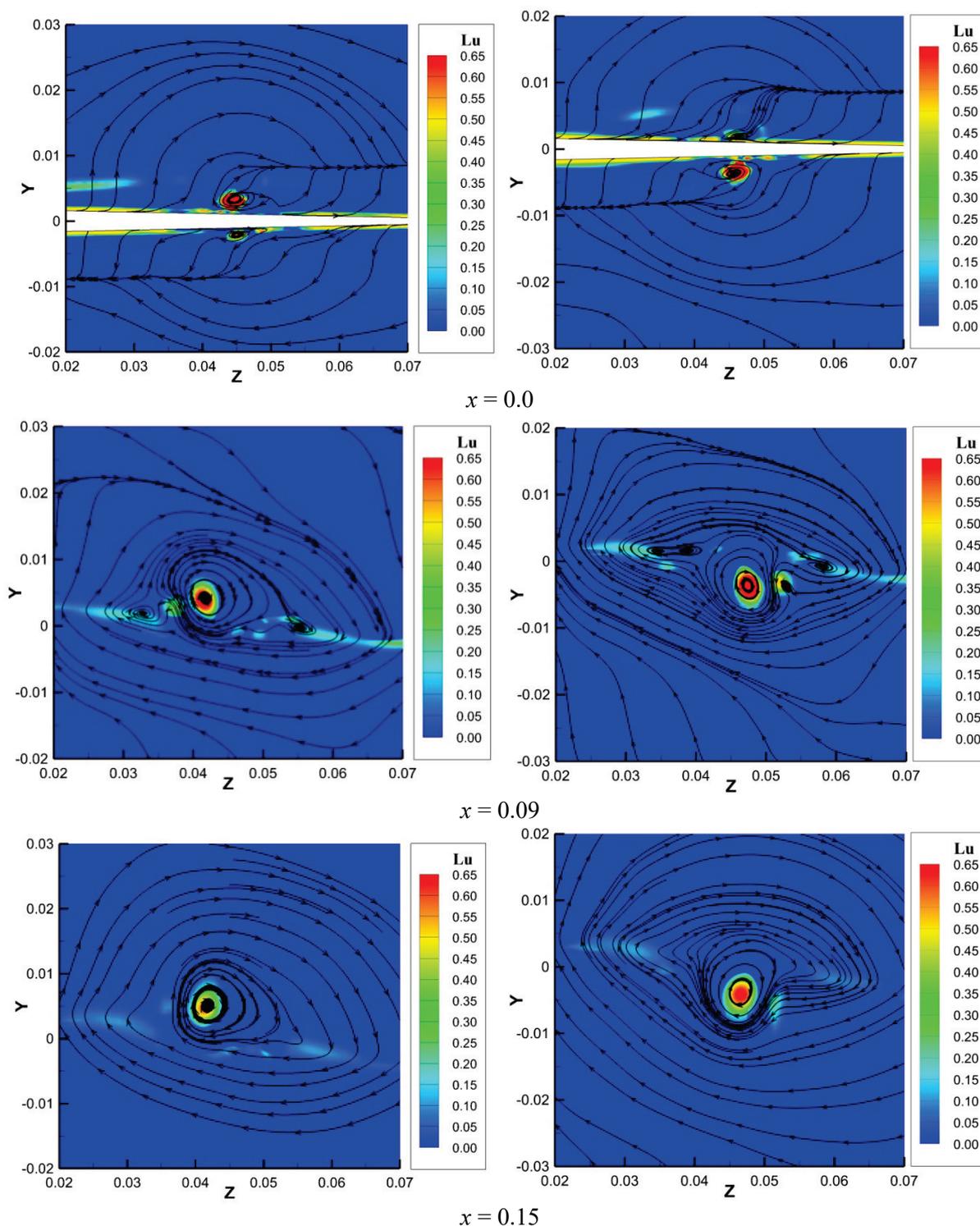
**Рисунок 4** – Распределение давления ( $P$ ) в поперечном сечении  $x = -0.0125$ , а) тандем1, б) тандем2

При взаимодействии концевой вихря с крыла генератора и основного крыла происходит образование нескольких вторичных вихрей. Это можно наблюдать на рисунке 5, где показаны результаты применению Лютекс метода при значении  $\tilde{\Omega}_R = 0.52$ .



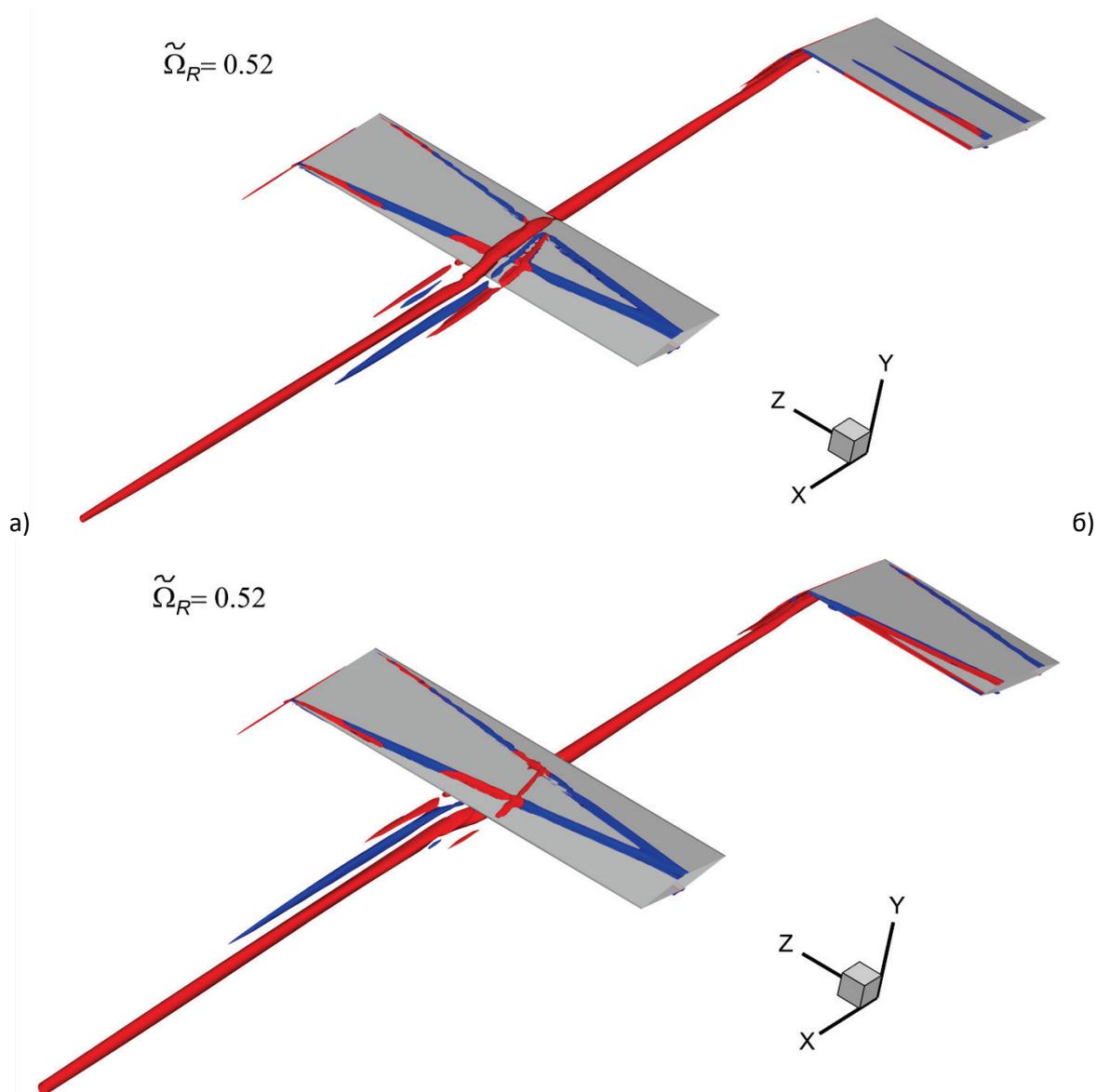
**Рисунок 5** – Результаты применения Лютекс метода для тандема1 (а) и тандема2 (б): показано распределение модуля вектора завихренности на изоповерхностях  $\tilde{\Omega}_R = 0.52$

Непосредственно за основным крылом в обеих конфигурациях наблюдается порядка 5 – 6 вихрей. Эти вихри включают в себя рассеченный вихрь с крыла генератора и вторичные вихри, появившиеся в результате взаимодействия вихря с крыла генератора и вихревой пелены с основного крыла. Вторичные вихри достаточно быстро диссипируют. Кроме того, часть из них имеет направление вращения противоположное направлению вращения основного вихря с крыла генератора. Это хорошо проиллюстрировано на рисунке 6, где показано распределение величины  $\tilde{\Omega}_R$  Лютекс критерия и линии тока в поперечных сечениях  $x = 0.0$ ;  $x = 0.09$  и  $x = 0.15$  соответственно, а также на рисунке 7, где вихри одного направления вращения окрашены красным, а противоположного – синим.



**Рисунок 6** – Распределение величины  $\tilde{\Omega}_R$  Лютекс критерия и линии тока в поперечных сечениях  $x = 0.0$ ;  $x = 0.09$  и  $x = 0.15$  для конфигурации тандем1 (слева) и тандем2 (справа)

Факт образования вторичных вихрей качественно согласуется с экспериментальными и численными данными для несжимаемых течений [17, 18].



**Рисунок 7** – Разным цветом показано направление вращения вихревых структур (красным - со-направлено концевым вихрям, синим – противоположное) для изоповерхности  $\tilde{\Omega}_R = 0.52$

## 6. Заключение

В работе представлены результаты анализа и научной визуализации задачи сверхзвукового обтекания тандема крыльев в двух конфигурациях, отличающихся вертикальным расположением основного крыла относительно крыла-генератора. Расчеты были выполнены с помощью авторского программного комплекса ARES на суперкомпьютере K-60, для визуализации вихревых течений использовался специальный модуль постобработки результатов расчетов.

Для идентификации и визуализации вихревых структур применялся Лютекс-критерий (Liutex). С его помощью было получено, что концевой вихрь с крыла генератора в обеих конфигурациях тандема разрезается основным крылом на две части с образованием 5-6 вторичных вихрей, часть из которых имеет направление вращения противоположное направлению вращения концевой вихря. Вторичные вихри достаточно быстро диссипируют. Факт образования вторичных вихрей качественно согласуется с экспериментальными и численными данными для несжимаемых течений.

## 7. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-21-00470.

## 8. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. 3 (91).
- [2] Epps B.P. Review of Vortex Identification Methods // 55<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2017. AIAA 2017-0989. DOI: 10.2514/6.2017-0989.
- [3] Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. 13 3, с. 125 – 158. DOI: 10.26583/sv.13.3.13.
- [4] Liu C., Gao Y., Dong X., Wang Y., Liu J., Zhang Y., Cai X., Gui N. / Third generation of vortex identification methods: Omega and Liutex/Rortex based systems // J. Hydrodyn. 2019. 31 2, pp. 205–223.
- [5] Liu C., Gao Y., Tian S., Dong X. Rortex—A new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions // Phys. Fluids. 2018. 30:035103.
- [6] Shrestha P., Nottage C., Yu Y., Alvarez O., Liu C. / Stretching and shearing contamination analysis for Liutex and other vortex identification methods // Advances in Aerodynamics. 2021. 3 8.
- [7] Liu J., Liu C. Modified normalized Rortex/vortex identification method // Phys. Fluids. 2019. 31:061704, 6 p.
- [8] Dong X., Gao Y., Liu C. New normalized Rortex/vortex identification method // Phys. Fluids. 2019. 31:011701, 6 p.
- [9] Allmaras S.R., Johnson F.T., Spalart P.R.. Modifications and Clarifications for the Implementation of the Spalart-Allmaras Turbulence Model // Seventh International Conference on CFD (ICCFD7), Big Island, Hawaii, 9-13 July 2012.
- [10] Быков Л.В., Молчанов А.М., Щербаков М.А., Янышев Д.С.. Вычислительная механика сплошных сред в задачах авиационной и космической техники // М.: ЛЕНАНД. 2015. 688 с.
- [11] В.Е. Борисов, А.А. Давыдов, И.Ю. Кудряшов, А.Е. Луцкий, И.С. Меньшов. Параллельная реализация неявной схемы на основе метода LU-SGS для моделирования трехмерных турбулентных течений // Математическое моделирование, 2014, 26 (10), с. 64–78; V.E. Borisov, A.A. Davydov, I.Yu. Kudryashov, A.E. Lutsky, I.S. Men'shov. Parallel Implementation of an Implicit Scheme Based on the LU-SGS Method for 3D Turbulent Flows // Mathematical Models and Computer Simulations, 2015, 7 (3), p. 222–232.
- [12] Программный комплекс ARES для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах. В.Е. Борисов, А.А. Давыдов, И.Ю. Кудряшов, А.Е. Луцкий. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667338, 23.12.2019.
- [13] Вычислительный комплекс K-60 // URL: <https://www.kiam.ru/MVS/resources/k60.html> .
- [14] Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // Journal of Fluid Mechanics. 1995. Volume 285, pp. 69–94.
- [15] Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows // Technical Report № CTR-S88. Palo Alto: Center for Turbulent Research. 1988. pp 193–208.
- [16] Konstantinovskaya T.V., Borisov V.E. , Lutsky A.E. Visualization Problems of a Supersonic Tip Vortex in a Heat Wake // Scientific Visualization. 2022. 14 4, pp. 71 – 82. DOI: 10.26583/sv.14.4.07.
- [17] Chen C., Wang Z., Gursul I. Experiments on tip vortices interacting with downstream wings // Experiments in Fluids. 2018. 59 5. Art. 82. 24 p. DOI: 10.1007/s00348-018-2539-7.
- [18] Гаджиев Д.А., Гайфуллин А.М. Эволюция двух вихрей вблизи твердой поверхности // Прикладная механика и техническая физика. 2018. 59 2, с. 31-38.