

УДК 533.6.011.72

## КРИТЕРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФЕРРИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ ПРИ ОТСУТСТВИИ ТОЧЕК ВЕТВЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

М. А. Зубин<sup>1,\*</sup>, Ф. А. Максимов<sup>1,2,\*\*</sup>, Н. А. Остапенко<sup>1,\*\*\*</sup>

Представлено академиком РАН В.А. Левиным 04.09.2019 г.

Поступило 10.09.2019 г.

На основе результатов численного исследования управления структурой течения около ромбовидного крыла с коническим сопряжением консолей при обтекании со скольжением на режимах со сверхзвуковыми передними кромками определены критерии существования вихревых особенностей Ферри в отсутствие точек ветвления головной и внутренней ударных волн.

*Ключевые слова:* сверхзвуковые конические течения, ударные волны, вихревые особенности Ферри, управление структурой течения, V-образное крыло.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896576-580>

В [1, 2] теоретически и экспериментально изучены разнообразные, ранее не описанные структуры течения в ударном слое около ромбовидного крыла. В [2] изучен режим течения со срывным вихрем в ударном слое, реализующимся непосредственно за точкой излома поперечного контура на подветренной консоли при обтекании с углом скольжения, изменяющимся в некотором диапазоне. Было показано, что подобная структура существует до тех пор, пока в окрестности точки излома в коническом течении на сфере не создадутся условия, обеспечивающие существование центрированной волны разрежения. После чего вихрь от точки излома поперечного контура перемещается вниз по потоку.

В [3] предложено выбрать угол  $\delta$  полураствора конуса, вписанного в двугранный угол между консолями крыла, в качестве геометрической характеристики, способной качественно изменить структуру течения на подветренной консоли. Анализ результатов численных расчётов обтекания крыла с  $\gamma = 240^\circ$  и  $\beta = 45^\circ$  (рис. 1,  $\gamma$  и  $\beta$  — угол раскрытия и угол при вершине консоли крыла,  $\alpha$  и  $\vartheta > 0$  — углы атаки и скольжения,  $U_\infty$  — скорость невозмущённого потока) при числах Маха  $M = 3$  и  $6$  в рамках теории

идеального газа показал, что при различных углах скольжения с увеличением  $\delta$  имеет место трансформация структуры потока, приводящая к исчезновению вихревых особенностей, а вместе с ними и линий растекания потока на подветренной консоли. На рис. 1 изображена структура течения на подветренной консоли в окрестности плоскости симметрии крыла с углом  $\delta = 3^\circ$  при  $M = 3$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\vartheta = 10^\circ$  (изомахи на сфере и линии тока — линии со стрелками). При  $\delta = 0$  около ромбовидного крыла за точкой излома поперечного контура реализуется срывной вихрь со сверхзвуковыми областями течения в возвратном потоке и по его внешнему обводу. Режим обтекания отличается “клиновидной” формой вихря в окрестности точки излома поперечного контура и слабым разрежением в центрированной волне, соответствующей излому между наветренной консолью и жидким клином [1]. При  $\delta = 3^\circ$  структура течения в окрестности плоскости симметрии качественно отличается от структуры течения при  $\delta = 0$ . В окрестности скругления поперечного контура крыла реализуется разгон потока до сверхзвуковых скоростей на сфере и перед сместившимся вниз по потоку вихрем образуется ударная волна, нормально падающая на стенку с интенсивностью, отвечающей числу Маха скорости потока у её основания  $M_n \approx 2$ . В соответствии с полученной в результате расчётов зависимостью  $M_n(\delta)$  следует, что при  $\delta \approx 6^\circ$  ударная волна, предшествующая критической точке узлового типа на подветренной консоли, уже не вызовет отрыва турбулентного пограничного слоя [4]. Вихрь (рис. 1) исчезает при  $\delta \approx 4,5^\circ$ . После чего на подветренной консоли продолжают существовать

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup> Институт автоматизации проектирования Российской Академии наук, Москва

\*E-mail: [zubinta@mail.ru](mailto:zubinta@mail.ru)

\*\*E-mail: [f\\_a\\_maximov@mail.ru](mailto:f_a_maximov@mail.ru)

\*\*\*E-mail: [ostap@imec.msu.ru](mailto:ostap@imec.msu.ru)

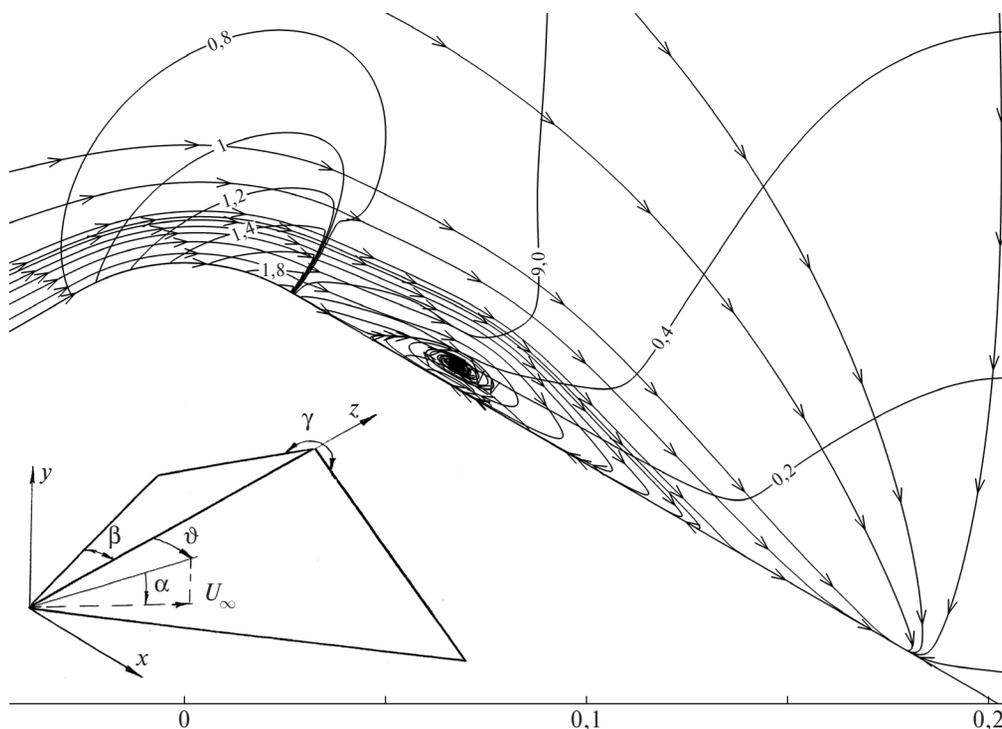


Рис. 1. Картина изомак и линий тока над подветренной консолью ромбовидного крыла при  $M = 3$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\vartheta = 10^\circ$ ,  $\delta = 3^\circ$ .

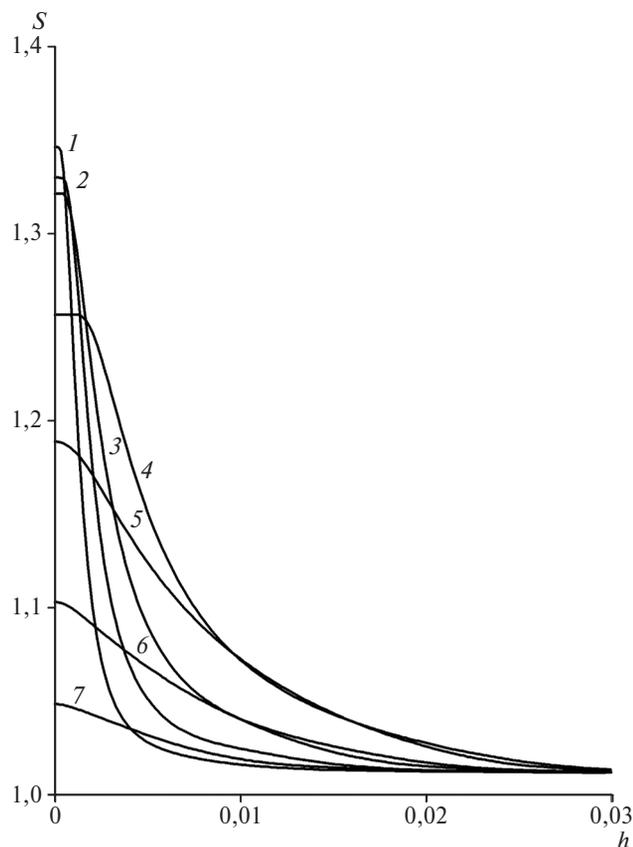
узел линий тока и ударная волна перед ним, обеспечивающая торможение поперечного течения от сверхзвуковых скоростей до нуля в критической точке.

В целом согласно данным расчётов структура течения около ромбовидного крыла с коническим сопряжением консолей при увеличении угла скольжения качественно претерпевает изменения, характерные для структуры течения около V-образного крыла с углом раскрытия  $\gamma < \pi$  с маховской системой ударных волн при уменьшении угла атаки [5]. Отличие состоит лишь в том, что узел линий тока располагается в точке излома контура V-образного крыла, тогда как на ромбовидном крыле ( $\gamma > \pi$ ) со скольжением он находится на подветренной консоли вниз по потоку. Однако само существование вихревых структур в случае ромбовидного крыла со скруглением в окрестности плоскости симметрии является неожиданным фактом, поскольку в соответствии с данными [6] должен иметь место контактный разрыв с определёнными свойствами, порождающий вихревую особенность, который в задаче о ромбовидном крыле отсутствует.

В [6] были определены два критерия, выполнение которых необходимо для существования вихревых особенностей Ферри. Это число Маха  $M_n$  скорости, нормальной лучу, проходящему через точку ветвления маховской конфигурации ударных волн, и ска-

чок коэффициента восстановления полного давления  $\Delta K$  на соответствующем контактном разрыве. Как видно, для существования невязких вихревых структур необходимо наличие точек ветвления ударных волн. Однако согласно рис. 1 точки ветвления скачков уплотнения в структуре течения отсутствуют. Этот факт позволяет допустить, что наличие контактного разрыва не является обязательным условием для существования вихревой особенности Ферри. Другими словами, контактный разрыв может быть представлен градиентным потоком с соответствующим скачком между уровнями коэффициента восстановления полного давления (энтропийной функции) на некоторых границах. Выше некоторого уровня должна быть и величина числа Маха  $M_n$  скорости, нормальной к скачку уплотнения, форма которого обеспечивает градиентный поток. Рассмотрим результаты расчётов исходя из этого положения.

На рис. 2 в качестве примера приведены распределения энтропийной функции  $S$  по нормали  $h$  к поверхности крыла ( $\gamma = 240^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\vartheta = 10^\circ$ ,  $M = 3$ ) за ударной волной, образующейся перед вихревой структурой (кривые 1–7 отвечают  $\delta = 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5^\circ$ ). Отождествляя положение воображаемого контактного разрыва, о чём было сказано выше, с максимальной производной  $\max S' \equiv mS'$  по  $h$ , можно сделать заключение, что  $mS'$  с ростом  $\delta$



**Рис. 2.** Распределения энтропийной функции  $S$  по нормали к поверхности крыла за внутренней ударной волной при  $M = 3$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\vartheta = 10^\circ$  для  $\delta = 0,25^\circ$ ;  $0,5^\circ$ ;  $1^\circ$ ;  $2^\circ$ ;  $3^\circ$ ;  $4^\circ$ ;  $5^\circ$  (кривые 1–7).

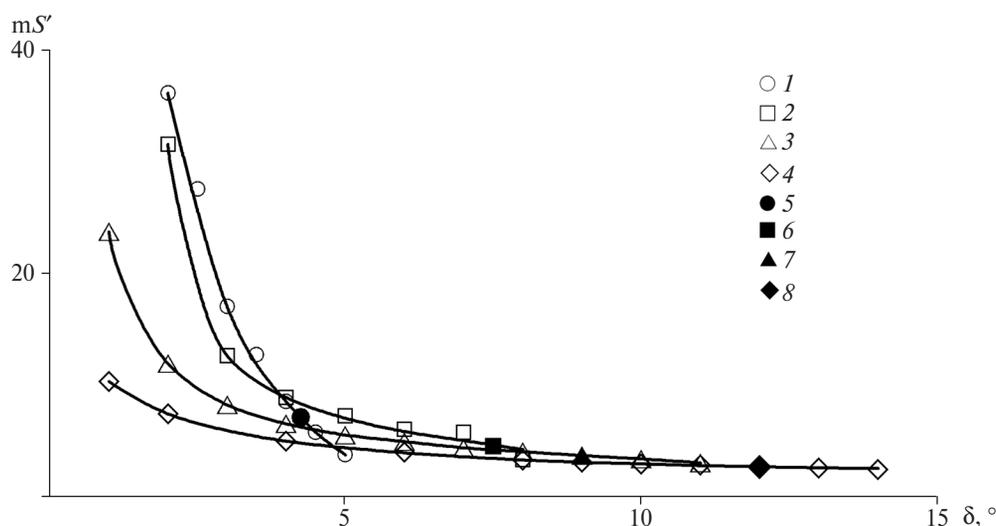
убывает, что отвечает уменьшению разности между максимальным значением  $S$  на стенке и её значением на периферии и является монотонной функ-

цией  $\delta$ . Последнее позволяет саму  $S'$  принять в качестве параметра, характеризующего интенсивность воображаемого контактного разрыва.

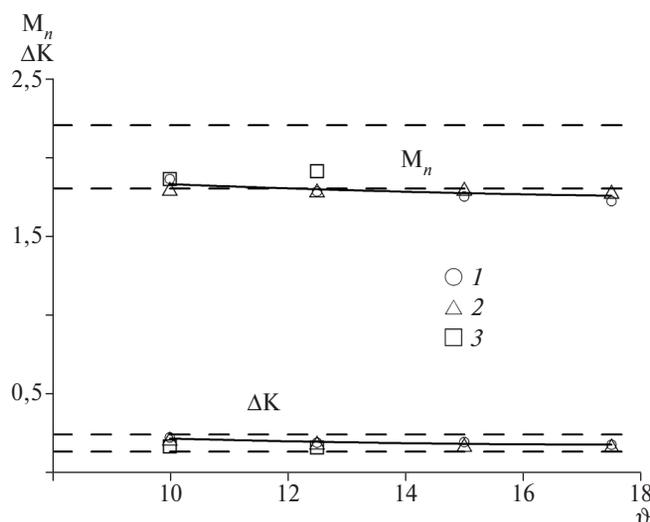
На рис. 3 представлены зависимости  $mS'$  для  $M = 3$ ,  $\alpha = 4^\circ$  и  $\vartheta = 10$ ;  $12,5$ ;  $15$ ;  $17,5^\circ$  (символы 1–4). Символами 5–8 указаны значения  $mS' = mS'^*$ , соответствующие исчезновению вихревых особенностей Ферри в структуре течения. Близость ординат указанных точек свидетельствует о существовании критерия по  $mS'^*$ , отвечающего переходу от структуры течения, содержащей вихревую особенность Ферри, к структуре без неё. Аналогичный вывод позволяет сделать анализ результатов расчётов для  $M = 3$ ,  $\alpha = 10^\circ$  и  $M = 6$ ,  $\alpha = 4^\circ$ .

На рис. 4 приведены области, ограниченные параметрами штриховых прямых, в которых согласно [6] располагаются критериальные значения  $M_n$  и  $\Delta K$  при  $M = 3$  и  $6$ , отвечающие исчезновению вихревых особенностей Ферри при наличии маховской конфигурации ударных волн. Символами 1–3 (1, 2 —  $M = 3$ ,  $\alpha = 4$  и  $10^\circ$ ; 3 —  $M = 6$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ) показаны значения  $M_n$  и  $\Delta K$ , определённые в соответствии с  $mS'^*(\alpha, \vartheta, M)$  и характерными уровнями в распределении энтропии (рис. 2). Наблюдается вполне удовлетворительная корреляция критериальных значений параметров при наличии и отсутствии точек ветвления ударных волн.

К сказанному следует добавить, что вихрь как газодинамический объект невязкого происхождения имеет место лишь при  $\delta = 0$  и  $\vartheta > 0$ , когда реализуется срыв потока с наветренной консоли крыла. При  $\delta > 0$  следует говорить о наличии или об отсутствии вихревой особенности Ферри.



**Рис. 3.** Зависимости максимальной производной энтропийной функции  $mS'$  при  $M = 3$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ; символы 1–4:  $\vartheta = 10^\circ$ ;  $12,5^\circ$ ;  $15^\circ$ ;  $17,5^\circ$ ; символы 5–8 — значения  $mS'$ , соответствующие исчезновению вихревых особенностей Ферри в структуре течения.



**Рис. 4.** Значения  $M_n$  и  $\Delta K$ , отвечающие исчезновению вихревых особенностей Ферри: символы 1, 2 —  $M = 3$ ,  $\alpha = 4$  и  $10^\circ$ , 3 —  $M = 6$ ,  $\alpha = 4^\circ$ .

В [1] среди разнообразных структур, реализующихся около V-образного крыла с углом раскрытия  $\gamma > \pi$  ( $\gamma = 240^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $M = 6$ ) и увеличении угла скольжения, в частности, был обнаружен “разрыв” в динамике развития структуры течения. Режимы течения со срывным вихрем при некотором угле скольжения сменяются режимами с центрированной волной разрежения в окрестности центральной хорды и со смещённым вниз по потоку вихрем, перед которым существует ударная волна, а они, в свою очередь, — режимами с единственной вихревой структурой (вихревой особенностью Ферри), в которую входят все линии, попавшие от двух передних кромок в ударный слой. При дальнейшем увеличении угла скольжения режимы течения с вихревой особенностью сменяются режимами со смещённым вниз по потоку вихрем, сопровождаемым  $\lambda$ -конфигурацией ударных волн, подобной структуре, реализующейся при отрыве турбулентного пограничного слоя [4]. Анализ показал, что в соответствии с новыми критериями существования вихревых особенностей только в области “разрыва” в развитии структуры течения можно говорить о наличии в потоке вихревой особенности Ферри. При меньших и больших значениях угла скольжения по отношению к интервалу его изменения, отвечающему существованию особенности Ферри, следует

говорить просто о наличии на стенке вихря невязкого происхождения, что является важным при классификации элементов структуры сверхзвукового конического течения.

Таким образом, найдены новые критерии существования вихревых особенностей Ферри в отсутствие точек ветвления внутренних ударных волн, нормально падающих на подветренную консоль крыла перед критическими точками и реализующихся как при  $\vartheta > 0$  и  $\delta > 0$ , так и при  $\delta = 0$ .

**Источник финансирования.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18–01–00182).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // ДАН. 2016. Т. 469. № 6. С. 680–685.
2. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // ДАН. 2017. Т. 477. № 4. С. 410–414.
3. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // ДАН. 2019. Т. 485. № 3. С. 290–294.
4. Зубин М.А., Остапенко Н.А. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 6. С. 43–51.
5. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 6. С. 118–134.
6. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // ДАН. 2014. Т. 454. № 3. С. 282–288.

**CRITERIA OF EXISTENCE OF FERRY VORTEX SINGULARITIES  
IN SUPERSONIC CONICAL FLOWS IN THE ABSENCE  
OF BRANCH POINTS OF SHOCK WAVES**

**M. A. Zubin<sup>1</sup>, F. A. Maksimov<sup>1,2</sup>, N. A. Ostapenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Scientific Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Institute of Design Automation of the Russian Academy of the Sciences,  
Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.A. Levin September 4, 2019

Received September 10, 2019

Based on the results of a numerical study of the control of the flow structure near a diamond-shaped wing with conical conjugation consoles for sliding flow in regimes with supersonic leading edges, criteria are determined for the existence of Ferry vortex singularities in the absence of branch points of the head and internal shock waves.

*Keywords:* supersonics conical flows, shock waves, Ferry vortex singularities, control of the structure of flow, V-shaped wing.