

УДК 532.3

В.В. УДОВЕНКО, Е.А. СТРЕЛЬНИКОВА  
Институт проблем машиностроения А.Н. Подгорного НАН Украины**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКРЫЛКА ГЕРНИ ПРИ ОБТЕКАНИИ  
НЕСУЩЕГО ПРОФИЛЯ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ**

*В работе предложен метод расчета аэродинамических характеристик профилей, основанный на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса. Изучено влияние закрылка Герни. Рассматривается стационарное турбулентное двухмерное обтекание исследуемого объекта вязким сжимаемым газом. Проведено сравнение численных результатов с натурными экспериментами в аэродинамической трубе при различных углах атаки с использованием закрылка Герни, которое свидетельствует о достоверности разработанного метода и эффективности работы закрылка Герни для стандартных несущих профилей на малых скоростях.*

*Ключевые слова: аэродинамические характеристики, нестационарные уравнения Навье-Стокса, осреднение по Рейнольдсу, закрылки Герни*

В.В. УДОВЕНКО, О.О. СТРЕЛЬНИКОВА  
Институт проблем машинобудування А.М. Підгірного НАН України**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАКРИЛКА ГЕРНІ ПРИ ОБТІКАННІ НЕСУЧИХ ПРОФІЛІВ І  
ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ  
ДАНИМИ**

*В роботі запропоновано метод розрахунку аеродинамічних характеристик профілів, заснований на усереднених по Рейнольдсу рівняннях Нав'є-Стокса. Вивчено вплив закрилка Герні. Розглядається стаціонарне турбулентний двомірне обтікання досліджуваного об'єкту в'язким стисливим газом. Проведено порівняння чисельних результатів з натурними експериментами в аеродинамічній трубі при різних кутах атаки з використанням закрилка Герні, яке свідчить про достовірність розробленого методу і ефективності роботи закрилка Герні для стандартних несучих профілів на малих швидкостях.*

*Ключові слова: аеродинамічні характеристики, нестационарні рівняння Нав'є-Стокса, осереднення по Рейнольдсу, закрилки Герні*

V. UDOVENKO, E. STRELNIKOVA  
A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE GURNEY FLAP ON THE FLOW OF THE MAIN  
ROTOR AND COMPARISON OF THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION WITH  
EXPERIMENTAL DATA**

*The method of numerical simulation of the profile aerodynamic characteristics is developed. The method is based on RANS equations. The influence of the Gurney flap was studied. The stationary turbulence 2D flow of the research object by viscid compressible fluid was investigated. The comparison was accomplished of results obtained with pilot experiments in wind tunnel that has been validated the reliability of the proposed method and efficiency of sing the Gurney flap.*

*Key words: aerodynamic characteristics, Navier - Stockes non-stationary equations, Reynolds average equations, Gurney flap.*

**Актуальность проблемы**

С развитием численного моделирования позволяющего резко сократить стоимость и затраты времени на исследование аэродинамических характеристик стандартных несущих профилей, в инженерной практике прекратился фактический рост аэродинамического качества профилей для всех специфических направлений применения винтокрылой несущей системы. Дальнейшее исследование обтекания несущих систем заключается в применении статичных геометрических образований, таких как предкрылки и закрылки.

**Цель исследования**

Целью данного исследования является расчет эффективности закрылка Герни при обтекании широко распространенного профиля AV 216. Исследование было проведено с помощью решения задачи высокорейнольдсового трансзвукового обтекания профиля и дальнейшее сравнение полученных

результатов с натурными трубными экспериментами. Решение такой задачи позволит определить целесообразность применения закрылка Герни для увеличения качества профиля, а также позволит убедиться в адекватности ранее созданной математической модели, основанной на осреднённых по Рейнольдсу нестационарных уравнениях Навье-Стокса, описывающих нестационарное обтекание профиля.

#### Изложение основного материала исследования

**Метод решения.** Для расчета максимально полных аэродинамических характеристик, то есть при высокорейнольдсовом трансзвуковом обтекании, рассматривается стационарное турбулентное двухмерное обтекание исследуемого объекта вязким сжимаемым газом.

Такое течение может быть описано системой осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса, записанных, в общем случае, в локальной криволинейной вращающейся с постоянной скоростью  $\Omega$  системе координат

$$\frac{\partial QJ}{\partial t} + \frac{\partial F^j}{\partial \xi^j} = H, \quad (1)$$

где  $Q$  – вектор консервативных переменных в декартовой системе координат;

$F^j = F_i \xi_i^j J$  – вектор потоков в криволинейной системе координат;

$F_i$  – вектор потоков в декартовой системе координат;

$t$  – время;

$\xi^j$  – криволинейные координаты;

$\xi_i^j$  – метрические коэффициенты;

$J$  – якобиан преобразования координат.

**Численные результаты. Сравнение с экспериментом.** Исследования проводились для широко известного симметричного профиля AV 216. Условия численного эксперимента заключались в расчете обтекания при числе Маха 0.1; углах атаки от  $\alpha = -2^\circ$  до  $\alpha = 10^\circ$ ; числе Рейнольдса, рассчитанных по формуле  $Re = 8 \cdot M \cdot 10^6$ . Закрылок Герни представляет собой перпендикулярные к средней линии профиля наплывы, находящиеся на выходной кромке, обладающие следующими относительными размерами: 5% хорды профиля вниз и 2.5% хорды вверх рис.1

Аэродинамические характеристики профиля AV 216, полученные численными методами и в трубном эксперименте, сравнивались, как по значениям суммарных характеристик коэффициента подъемной силы и качества  $C_y(\alpha), C_y(C_x)$ , так и по виду распределения давления по нижней и верхней поверхностям профиля  $C_p = f(x)$ .

Для сравнения результатов численного эксперимента были выбраны трубные эксперименты, проведенные в ходе нашего исследования в аэродинамической трубе ТАД-2, находящейся в ГП «Антонов». На рис. 2 - 5 показано сравнение распределения давления по верхней и нижней поверхности в зависимости от наличия закрылка Герни, полученные численно и экспериментально, при заданных углах атаки. Полученные данные свидетельствуют о влиянии закрылка Герни, выражающееся, в увеличении коэффициента подъемной силы. Однако одно лишь изменение коэффициента подъемной силы не говорит об улучшении качества профиля и его срывных характеристик, поэтому так же были изучены отношения коэффициента подъемной силы к коэффициенту сопротивления (качества профиля) рис.6 – 7. и картина течения вокруг исследуемого профиля, а именно скорости потока. Несмотря на то, что картина обтекания исследуемого профиля вместе с закрылком Герни показывает наличие псевдо нестационарного течения, выражающееся, в отрывах потока от самого закрылка с установившимся периодом, мы наблюдаем неоспоримое увеличение качества профиля. Так же картина скоростного потока вокруг профиля показывает отклонение спутного следа вдоль средней линии профиля в отличие от привычного направления вдоль вектора набегающего потока. Данная особенность непременно приводит к большей срывной устойчивости профиля, что так же является неоспоримым преимуществом, однако требует дальнейшего детального исследования для больших скоростей обтекания.

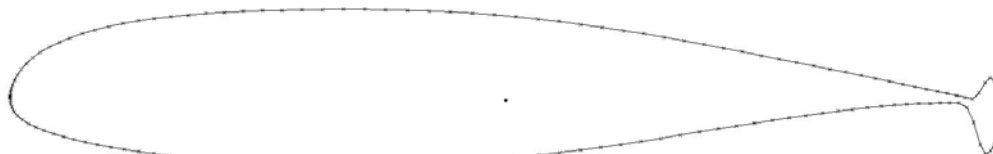


Рис. 1. Демонстрация расчетной схемы профиля AV 216 с закрылком Герни

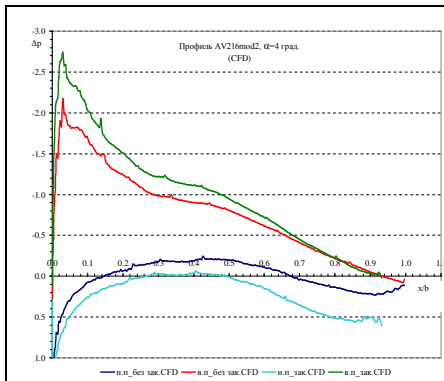


Рис. 2.  $C_p = f(x)$  в зависимости от наличия закрылка для  $\alpha=4^\circ$  (численный метод)

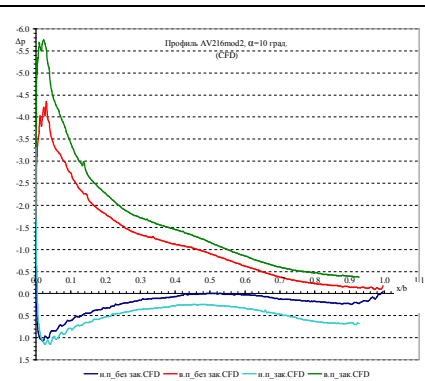


Рис. 3.  $C_p = f(x)$  в зависимости от наличия закрылка для  $\alpha=10^\circ$  (численный метод)

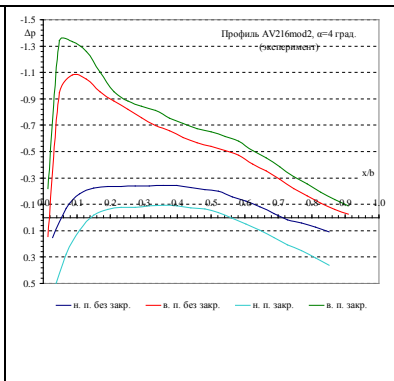


Рис. 4.  $C_p = f(x)$  в зависимости от наличия закрылка для  $\alpha=4^\circ$  (эксперимент)

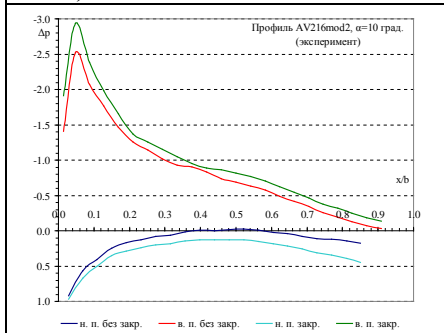


Рис. 5.  $C_p = f(x)$  в зависимости от наличия закрылка для  $\alpha=10^\circ$  (эксперимент)

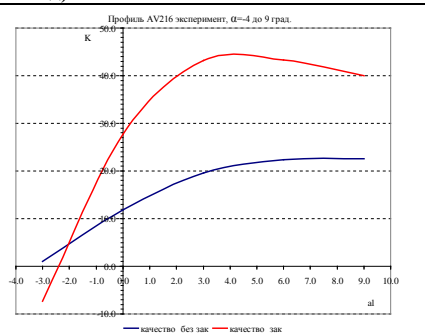


Рис. 6. качество профиля в зависимости от применения закрылка для  $\alpha=-4-9^\circ$  (эксперимент)

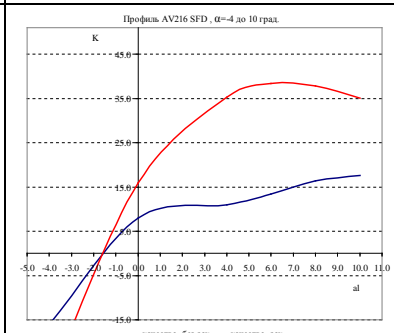


Рис. 7. качество профиля в зависимости от применения закрылка для  $\alpha=-4-10^\circ$  (SFD)

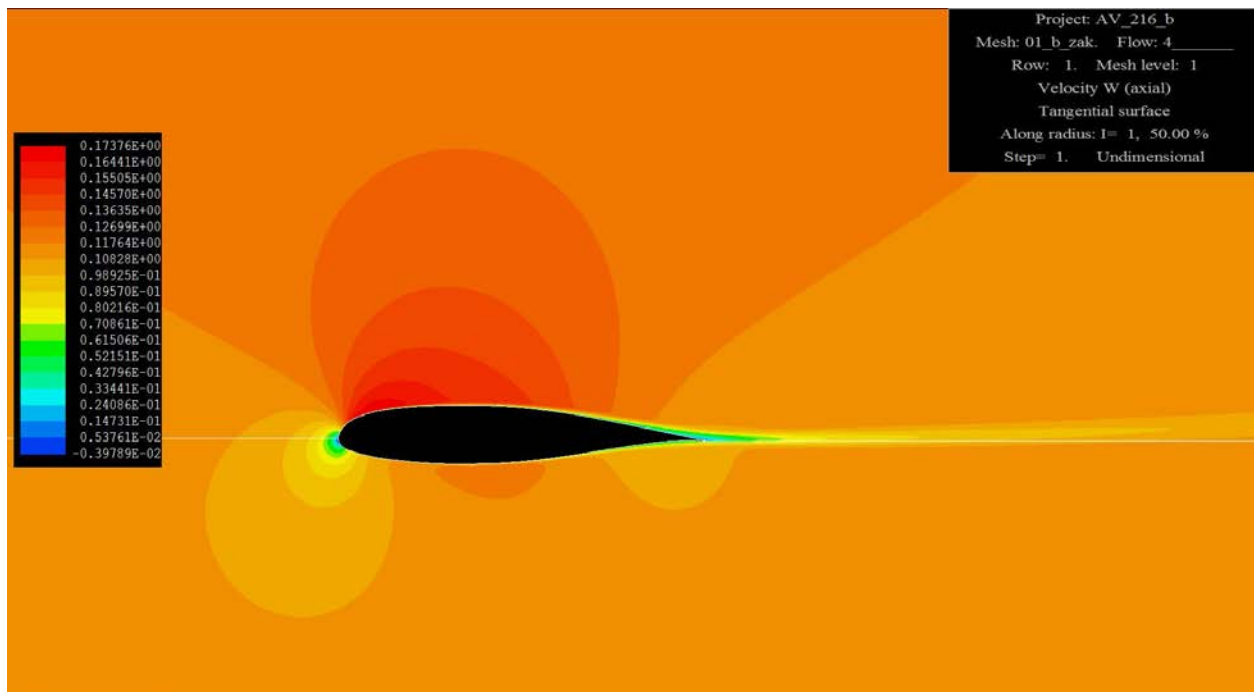


Рис. 8. Демонстрация моментального поля скорости вокруг профиля AV 216 без закрылка Герни и  $\alpha = 4^\circ$

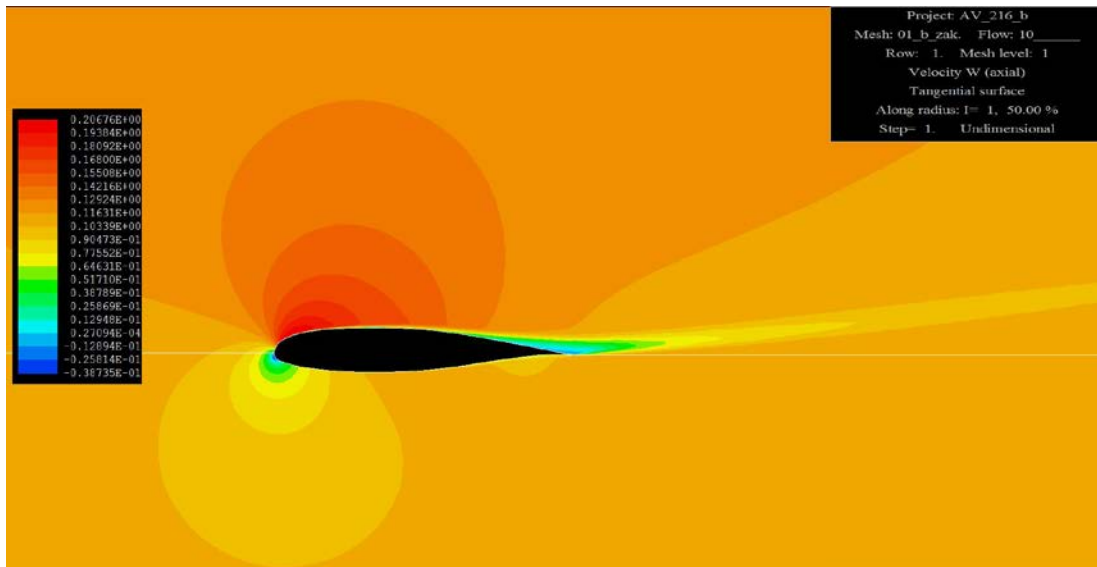


Рис. 9. Демонстрація моментального поля швидкості навколо профіля AV 216 без закріпки Герні і  $\alpha = 10^\circ$

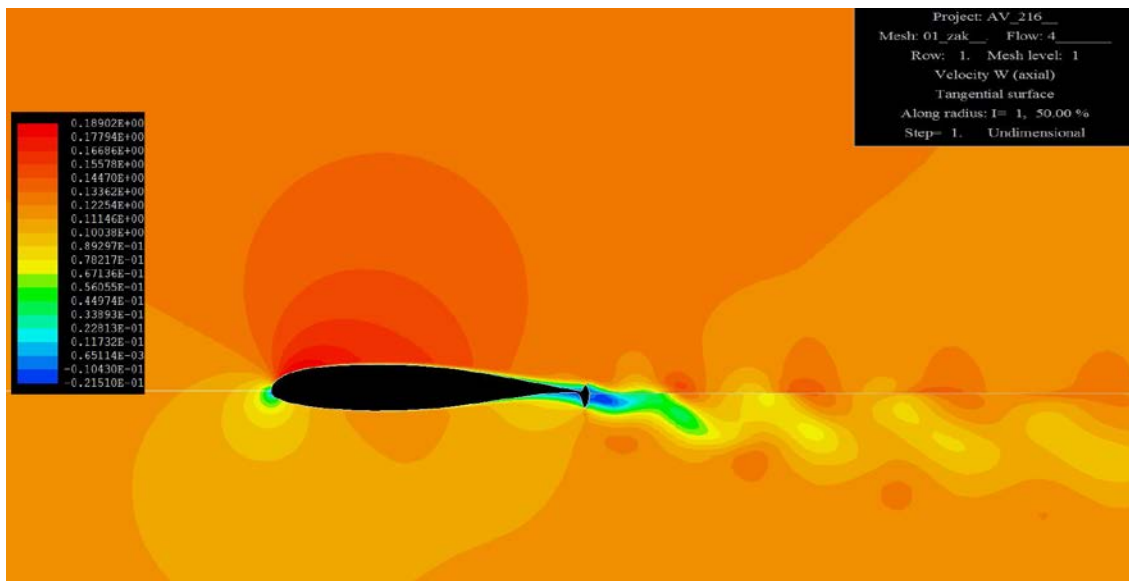


Рис. 10. Демонстрація моментального поля швидкості навколо профіля AV 216 з закріпкою Герні і  $\alpha = 14^\circ$

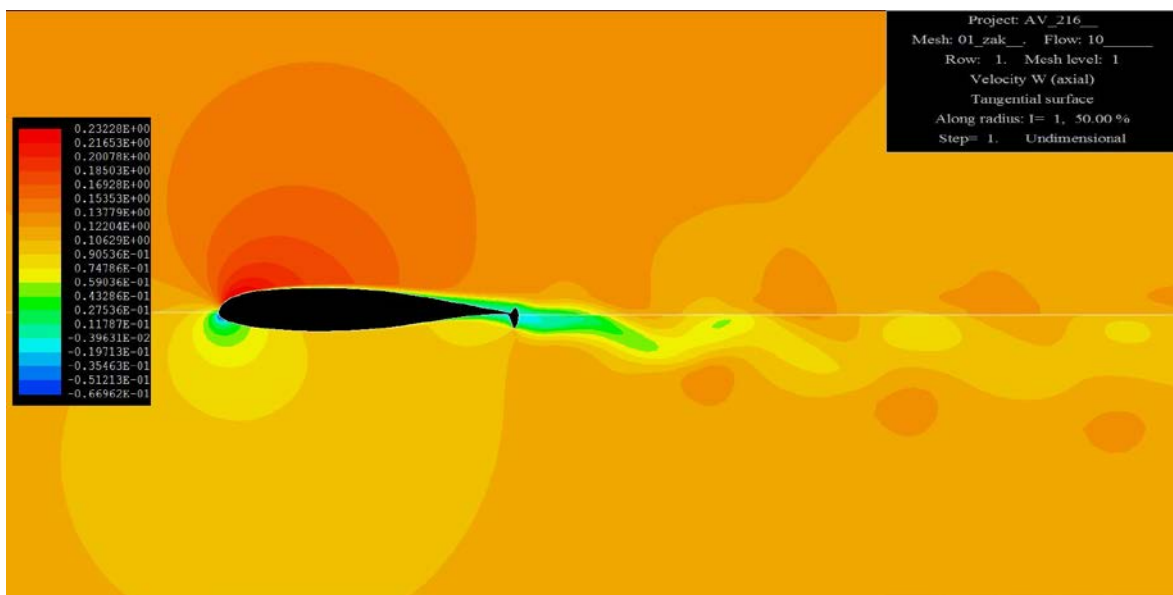


Рис. 11. Демонстрація моментального поля швидкості навколо профіля AV 216 з закріпкою Герні і  $\alpha = 10^\circ$

**Выводы**

Рассмотрено стационарное турбулентное двухмерное обтекание профиля AV 216 вязким сжимаемым газом. Проведено сравнение численных результатов с натурными экспериментами в аэродинамической трубе при различных углах атаки, которое свидетельствует о эффективности применения закрылка Герни для повышения качества профиля, работающего на невысоких скоростях, а так же о достоверности и эффективности разработанного численного метода, ранее предложенного в [3].

**Список используемой литературы**

1. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверманн А.С. и др. Вертолеты. Расчет и проектирование.- М.: Машиностроение, 1966.- Кн. 1- 456 с.
2. Harris,C.D.,Two-Dimensional Aerodynamic Characteristics Of The NACA 0012 Airfoil In the Langley 8-Foot Transonic Pressure Tunnel, NASA TM-81927 (1981)
3. Удовенко В.В., Стрельникова Е.А. Сравнение экспериментальных аэродинамических характеристик профилей с результатами численного моделирования для режима трансзвукового обтекания, Вестник ХНТУ. –Херсон: ХНТУ, №58, 2016.