

– вероятность сближения РН с КО в запуске на расстояние менее 100 м составляет  $1,3 \cdot 10^{-6}$ , что почти в три раза меньше аналогичной вероятности для солнечно-синхронных орбит [2].

### Библиографические ссылки

1. **Вениаминов, С. С.** Космический мусор – угроза человечеству [Текст]: монография / С. С. Вениаминов. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 207 с.
2. **Голубек, А. В.** Исследование взаимных сближений ракеты-носителя на активном участке траектории с космическими объектами [Текст] / А. В. Голубек // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Ракетно-косм. техніка. – 2014. – Т. 22, № 4. – С. 26 – 35.
3. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
4. **Назаренко, А. И.** Моделирование космического мусора [Текст]: монография / А. И. Назаренко. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 216 с.
5. **Firooz, A. A.** Safety Design For Space Operations [Text] / A. A. Firooz, I. Rongier, P. D. Wilde, T. Sgobba. – Oxford: Elsevier Ltd., 2013. – 1081 p.
6. **Klinkrad, H.** Space Debris Models and Risk Analysis [Text] / H. Klinkrad. – Chichester: Praxis Publishing Ltd., 2006. – 430 p.
7. **Liou, J.-C.** «Stability of the Future LEO Environment» [Text]: status review / J.-C. Liou // 28th IADC Meeting. – 8–12 Mar. 2010. – Trivandrum.
8. Current Debris Environment in Low Earth Orbit [Text] // Orbital Debris Quarterly News. NASA. – 2009. – June – Vol. 13, iss. 3. – P. 7.
9. **Steel, D.** The Orbital Debris Collision Hazard for Proposed Satellite Constellations [Electronic resource] / D. Steel. – Access mode: <http://www.duncansteel.com/archives/1515>. – 30.04.2015. – Title from the screen.

*Надійшла до редколегії 18.05.2015*

УДК 532.516

**Н. В. Гришин<sup>1</sup>, А. А. Приходько<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Государственное предприятие «Конструкторское бюро “Южное” имени М.К. Янгеля»*

*<sup>2</sup>Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА ПРИ ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

Моделирование поперечного обтекания цилиндра выполнено с применением нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса несжимаемой и сжимаемой жидкостью. Численное решение системы исходных уравнений получено с помощью метода контрольных объемов. Представлены результаты сверхзвукового обтекания цилиндра при использовании различных подходов к моделированию турбулентности.

*Ключевые слова:* сверхзвуковое обтекание, дозвуковое обтекание, цилиндр, уравнения Навье-Стокса, численное моделирование.

Моделювання поперечного обтікання циліндра виконано із застосуванням нестационарних тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса нестисливої та стисливої рідини. Числове розв'язання системи вихідних рівнянь отримано за допомогою методу контрольних об'ємів. Наведено результати надзвукового обтікання циліндра за допомогою різних підходів до моделювання турбулентності.

*Ключові слова:* надзвукове обтікання, дозвукове обтікання, циліндр, рівняння Нав'є-Стокса, числове моделювання.

**Simulation of cross flow along a cylinder was made with using of unsteady three-dimensional Navier-Stokes equations for incompressible and compressible fluid. Numerical solution of reference equations was got with control volume approach. It presents results of supersonic flow along a cylinder with using of different turbulence model approaches.**

*Key words:* supersonic flow, subsonic flow, cylinder, Navier-Stokes equations, numerical simulation.

**Введение.** Исследование вихревых структур, возникающих при обтекании криволинейных тел, является актуальной проблемой современной аэродинамики [1-12]. Цилиндр как простая геометрическая форма используется во многих летательных аппаратах, наземных транспортных средствах и инженерных сооружениях. При обтекании цилиндра наблюдаются все основные явления, присущие вязко-невязким взаимодействиям набегающего потока с телом. Наличие результатов экспериментальных данных обтекания цилиндра предоставляет возможности для проверки и сравнения их с результатами численного моделирования.

В данной работе представлены результаты численного моделирования поперечного обтекания цилиндра на дозвуковом режиме при  $Re=200$  и сверхзвуковом режиме при  $M=3.0$  и  $Re=2 \cdot 10^6$ .

**Постановка задачи.** Для численного моделирования поперечного обтекания цилиндра воспользуемся нестационарными трехмерными уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial x_i} = 0,$$

где для несжимаемой жидкости

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}; \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} u_i \\ u_i u_1 + \frac{1}{\rho} (\delta_{1i} p - \tau_{1i}) \\ u_i u_2 + \frac{1}{\rho} (\delta_{2i} p - \tau_{2i}) \\ u_i u_3 + \frac{1}{\rho} (\delta_{3i} p - \tau_{3i}) \end{bmatrix},$$

для сжимаемого газа

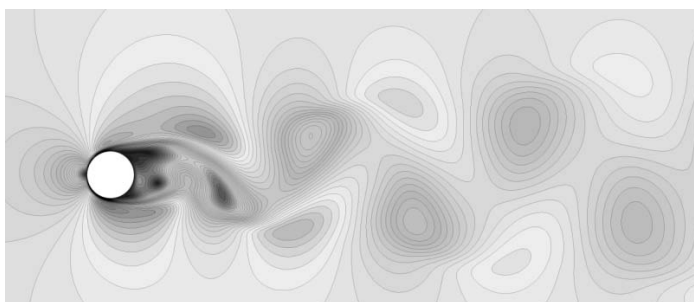
$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} c \\ c u_1 \\ c u_2 \\ c u_3 \\ e \end{bmatrix}; \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + \delta_{1i} p - \tau_{1i} \\ \rho u_i u_2 + \delta_{2i} p - \tau_{2i} \\ \rho u_i u_3 + \delta_{3i} p - \tau_{3i} \\ (e + p) u_i - u_j \tau_{ij} - q_i \end{bmatrix},$$

здесь  $t$  – время;  $x_i$  – декартовы координаты;  $u_i$  – декартовы компоненты вектора скорости;  $i, j = 1, 2, 3$  предполагается суммирование по одинаковым индексам;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $e$  – полная энергия;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора сдвиговых напряжений;  $q_i$  – компоненты вектора теплового потока.

**Численная методика.** Численное решение системы исходных уравнений получено с помощью метода контрольных объемов. В расчетах использовались численные методики, имеющие второй порядок аппроксимации по пространственным переменным. Расчетная область при дозвуковом обтекании состоит из 884 849 контрольных объемов, а при сверхзвуковом обтекании – 1 353 200 контрольных объемов. В обоих случаях минимальный шаг пристеночной сетки выбирался из условия  $y^+ < 2$ , где  $y^+$  – толщина вязкого подслоя.

**Результаты численного моделирования.** При малых числах Маха набегающий поток можно считать практически несжимаемым, поэтому основное влияние на физические процессы обтекания оказывает режим течения, который определяется числом Рейнольдса. При дозвуковом обтекании цилиндра (для чисел  $50 < Re < 300\,000$ ) в донной области за цилиндром возникает вихревая дорожка. Это происходит в основном из-за возникновения градиента давления в донной области цилиндра и непосредственной близости от поверхности цилиндра. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса пограничный слой становится турбулентным, вихревая дорожка сужается и переходит к беспорядочному движению. Таким образом, дозвуковое обтекание в основном может быть охарактеризовано положением точки отрыва потока, структурой отрывного течения в вихревом следе за цилиндром, а также частотой отрыва вихрей (число Струхала), которые зависят от величины числа Рейнольдса.

Результаты численного моделирования обтекания цилиндра несжимаемым потоком приведены на Рис. 1–4. В результате численного моделирования дозвукового обтекания цилиндра получены следующие аэродинамические характеристики:  $C_y = +0,518 \dots -0,518$ ,  $C_x = 1,34 \pm 0,03$ , число Струхала  $St = 0.182$  (Рис. 3). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными и численными расчетами других авторов.

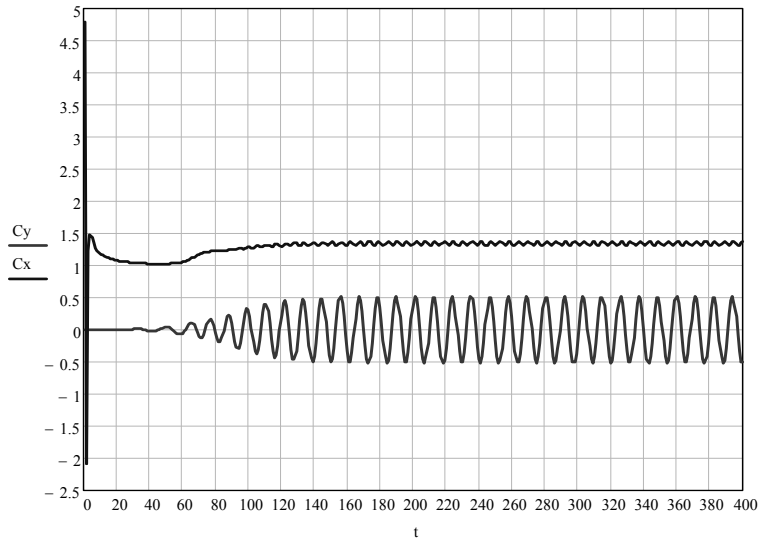


**Рис. 1.** Распределения модуля вектора скорости при дозвуковом обтекании цилиндра

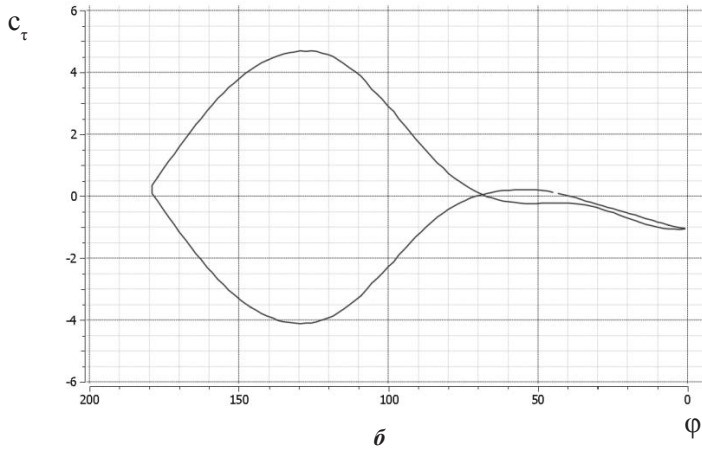
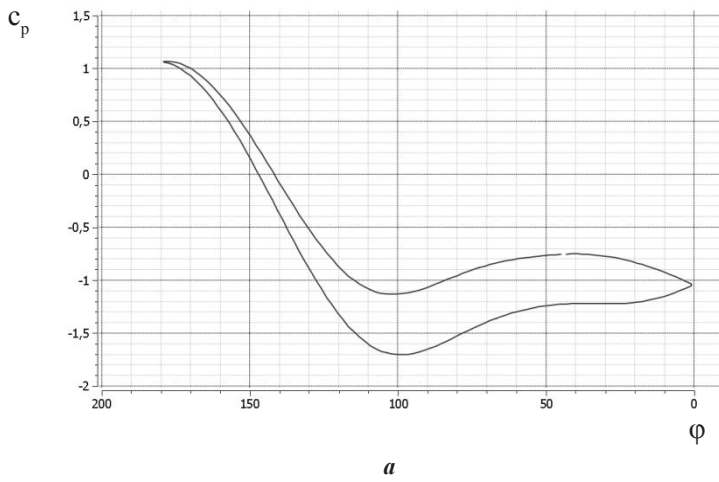


**Рис. 2.** Результаты экспериментальной визуализации вихрей при обтекании цилиндра для  $Re=140$  [6]

Обтекание цилиндра сверхзвуковым потоком характеризуется формированием отсоединенной головной ударной волны на наветренной части цилиндра. В донной области за цилиндром образуется веер волн разрежения и интенсивное вихревое течение. Сложная ударно-волновая структура обтекания формируется в результате взаимодействия хвостовых скачков уплотнения.

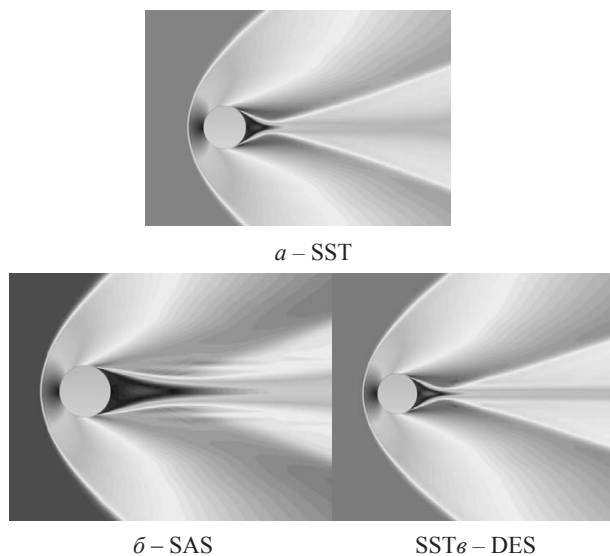


**Рис. 3. Изменение коэффициента подъемной силы и коэффициента лобового сопротивления с течением времени**

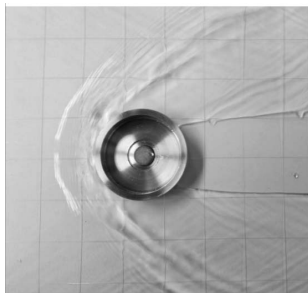


**Рис. 4. Распределение коэффициентов давления (а) и трения (б) на поверхности цилиндра для характерного момента времени  $t=400$**

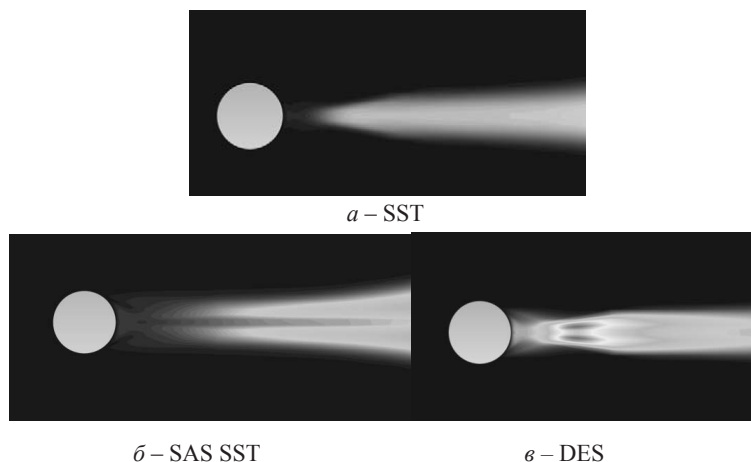
Результати моделювання сверхзвукового обтекания получены с использованием моделей турбулентности SST (Shear Stress Transport), SAS SST (Scale-Adaptive Simulation Shear Stress Transport) и DES (Detached Eddy Simulation) и приведены на Рис. 5–9. Картина обтекания соответствует характерному моменту времени  $t=50$ .



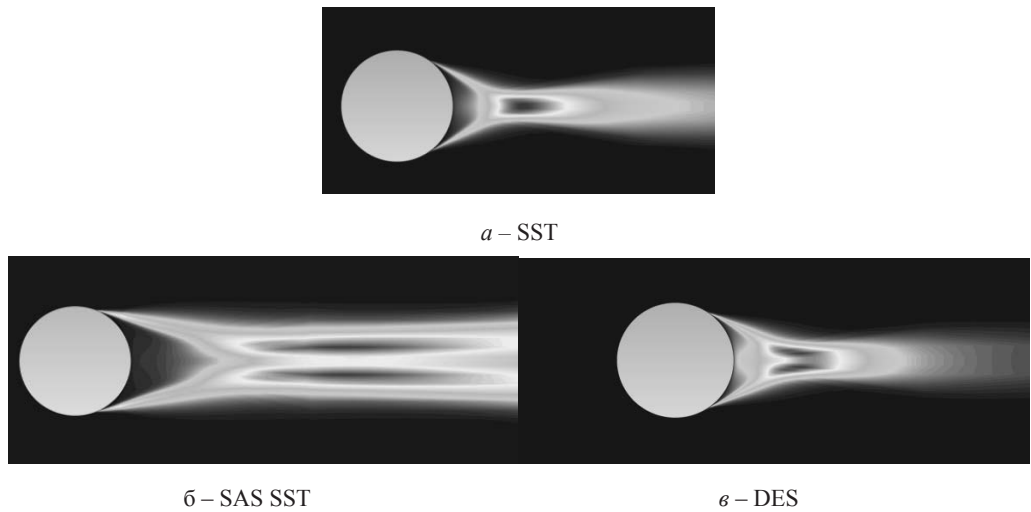
**Рис. 5. Распределение числа Маха при сверхзвуковом обтекании цилиндра для трех способов моделирования турбулентности**



**Рис. 6. Результаты экспериментальной визуализации обтекания цилиндра, соответствующие числу Маха  $M=3$  [11]**

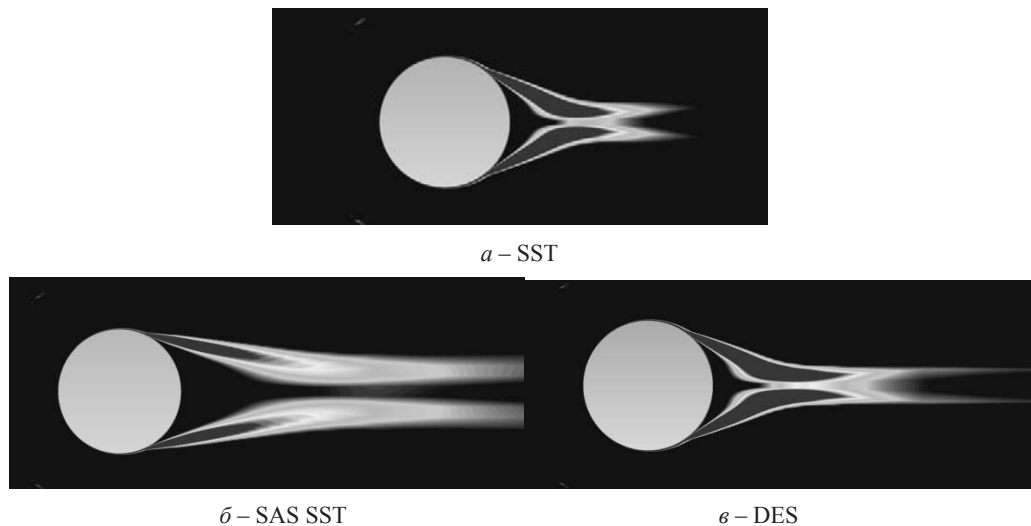


**Рис. 7. Распределение турбулентной вязкости при сверхзвуковом обтекании цилиндра**



**Рис. 8. Распределение кинетической энергии турбулентности при сверхзвуковом обтекании цилиндра**

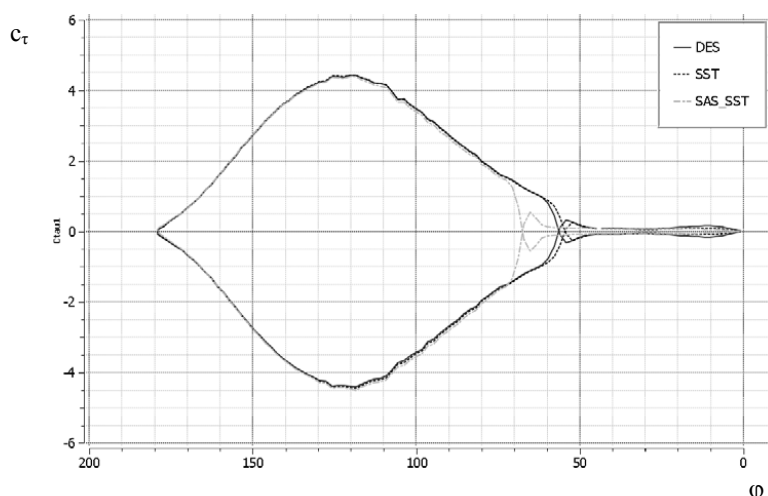
На наветренной части непосредственно перед цилиндром образуется отсоединенная ударная волна. Течение за практически плоской ударной волной вдоль поверхности цилиндра вплоть до угла  $45^\circ$  дозвуковое. В зависимости от выбранной модели турбулентности в районе угла  $120^\circ$  (отсчет ведется от левой границы цилиндра) пограничный слой отрывается. В следе за цилиндром слабые возмущения сливаются в хвостовой скачок уплотнения.



**Рис. 9. Распределение модуля вектора завихренности при сверхзвуковом обтекании цилиндра**

Сравнение различных моделей турбулентности показывает, что профиль распределения числа Маха практически не отличается друг от друга, различие проявляется только в донной части за цилиндром и на распределении кинетической энергии турбулентности, эффективной вязкости и завихренности. Так, модель турбулентности SST показала удовлетворительный результат в пристеночном слое. Модель турбулентности SAS SST позволяет исследовать формирование в потоке вихрей различных масштабов. Моделирование турбулентности с помощью отсоединенных вихрей (DES) является гибридной моделью, комбиниру-

ющей лучшие свойства полуэмпирических моделей на основе осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса (RANS) и моделирования крупных вихрей (LES). Распределение характеристик потока, демонстрирующих интенсивность развития турбулентности при сверхзвуковом обтекании цилиндра для различных способов моделирования турбулентности, приведено на Рис. 6–9.



**Рис. 10. Распределение коэффициента трения на поверхности цилиндра при сверхзвуковом обтекании цилиндра для моделей турбулентности SST, SAS SST и DES**

Модель турбулентности также оказывает влияние и на формирование точки отрыва потока на поверхности цилиндра (Рис. 10). По результатам моделирования, угловое положение точки отрыва потока для моделей турбулентности SST и DES оказалось близким по значению,  $54^\circ$  и  $56^\circ$  (отсчет ведется от правой границы цилиндра) соответственно. Применение модели турбулентности SAS SST показало незначительный сдвиг точки отрыва в сторону увеличения угла, что в итоге составило  $67^\circ$ . Это может быть объяснено особенностью модели SAS SST, в частности ее положительной стороной – качественное описание вихрей вдали от стенок, что оказывает незначительное влияние на пристеночный слой, в результате наблюдается перемещение точки отрыва потока по поверхности цилиндра.

**Выводы.** По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При дозвуковых скоростях картина обтекания характеризуется в основном числом Рейнольдса, которое влияет на положение точки отрыва, структуру отрывного течения в вихревом следе за цилиндром, а именно амплитуду и частоту схода вихрей, и колебаниями коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления.

2. При обтекании цилиндра сверхзвуковым потоком на наветренной части формируется головная ударная волна. В донной области за цилиндром образуется веер волн разрежения и интенсивное вихревое течение. Сложная ударно-волновая структура обтекания формируется в результате взаимодействия хвостовых скачков уплотнения.

3. Выбор модели турбулентности сильно влияет на масштабы вихрей особенно в донной области. Гибридные подходы моделирования турбулентности показали лучший результат описания физических явлений турбулентности как вблизи пограничного слоя, так и в следе за цилиндром.



### Библиографические ссылки

1. Алхимов, А. В. Моделирование турбулентности при пространственном обтекании цилиндра дозвуковым потоком [Текст] / А. В. Алхимов, А. А. Приходько // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. – № 4. – Т. 22. – 2014 – С. 14 – 22.
2. Аржанников, Н. С. Аэродинамика [Текст] / Н. С. Аржанников, В. Н. Мальцев. – М.: Оборонгиз, 1956. – 483с.
3. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений [Текст] / И. А. Белов, С. А. Исаев. – С.-Пб.: Балт. техн. ун-тет, 2001. – 108 с.
4. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / О. М. Белоцерковский.–М.: Физматлит, 1994. – 448 с.
5. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование нестационарного периодического течения вязкой жидкости в следе за цилиндром [Текст] / О. М. Белоцерковский. – Ж. вычисл. и мат. физ. – 1984. – Т. 24. – С. 1207–1216.
6. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа [Текст] / М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986.–184 с.
7. Гарбарук, А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст] / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – С-Пб.: Изд-во Политех. ин-та, 2012. – 88 с.
8. Приходько, О. А. Численное моделирование нестационарных несжимаемых течений на основе уравнений Навье-Стокса в произвольной системе координат [Текст] / О. А. Приходько, Д. А. Редчиц. – Прикл. гидромеханика, 2005. – Т.7(79). – №1. – С. 56–71.
9. Фрост, У. Турбулентность. Принципы и применение [Текст] / У. Фрост, Т. Моулден. – М.: Мир, 1980. – 535 с.
10. Чжен, П. Отрывные течения [Текст] / П. Чжен. – М.: Мир, 1972–1973. – Т. 1–3.
11. Elsbury, S. Integrated rocket Ramjet [Text]/S. Elsbury, N. Randall, C. Sundquist, R. Willis advised by Dr. John Crepeau, Dr. Tao Xing. – Engineering design EXPO2015, University of Idaho, poster presentation.–1 p.
12. Sume, B. Hydrodynamics around cylindrical structure [Text] / B. Sume, J. Fredsoe. – Singapore. World Scientific, 2006. –530 p.

*Надійшла до редколегії 02.06.2015*

УДК 621.43

**О. М. Губа, О. В. Золотько, О. Є. Золотько**

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

### **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РЕАКТИВНОГО СТРУМЕНЯ ДЕТОНАЦІЙНОГО ДВИГУНА**

**Проведено порівняльний аналіз спектрів шуму турбореактивних і детонаційних двигунів. Виконано експертну оцінку можливих альтернативних способів вирішення проблеми зниження шуму детонаційних двигунів. Методом аналізу ієрархій обґрунтовано вибір ежекторних насадків як раціональних пристроїв для зменшення рівня шуму.**

*Ключові слова:* спектр шуму, детонаційний двигун, аналіз, ієрархія, ежектор, пристрій.

**Проведен сравнительный анализ спектров шума турбореактивных и детонационных двигателей. Выполнена экспертная оценка возможных вариантов альтернативных решений проблемы уменьшения шума детонационных двигателей. Методом анализа иерархий обоснован выбор ежекторных насадков в качестве рационального устройства снижения уровня шума.**

*Ключевые слова:* спектр шума, детонационный двигатель, анализ, иерархия, ежектор, устройство.

© О. М. Губа, О. В. Золотько, О. Є. Золотько, 2015