

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Надолин К.А.* Об одном подходе к моделированию пассивного массопереноса в русловых потоках // Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21, № 2. – С. 14-28.
2. *Perry R., Green D.* Chemical Engineering Handbook. – 7th ed. – 2007. – P. 270.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.В. Наседкин.

Жиляев Игорь Витальевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: Zhilyaev@mail.com; 344038, г. Ростов-на-Дону, Нансена, 107/1, кв. 2; тел.: 89515209250; факультет математики, механики и компьютерных наук; кафедра математического моделирования; аспирант.

Надолин Константин Аркадьевич – e-mail: nadolin@math.sfedu.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Милячакова, 8-А; тел.: 89034341617; факультет математики, механики и компьютерных наук; кафедра математического моделирования; к.ф.-м.н.; доцент.

Zhilyaev Igor Vitalievich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: Zhilyaev@mail.com; 107/1, Nansena, ap. 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: 89515209250; faculty of mathematics, mechanics and computer science; the department of mathematical modeling; postgraduate student.

Nadolin Konstantin Arkadieovich – e-mail: nadolin@math.sfedu.ru; 8-А, Mil'chakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: 89034341617; Faculty of Mathematics, mechanics and Computer science; the department of mathematical modeling; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

УДК 532.517.4

В.Т. Калугин, С.В. Стрижак

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АППАРАТА-ЗОНДА
В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗЕ***

Целью работы является обоснование выбора оптимальной компоновки для диагностического аппарата “Сканлайнер”. В статье представлены результаты численных расчетов обтекания аппарата-зонда различной компоновки в закрученном потоке газа с помощью пакета OpenFOAM. Описана постановка задачи и метод решения. Уравнения Рейнольдса замкнуты с помощью модели турбулентности $k-\omega$ SST Менгера с пристеночной функцией. Проведен расчет аэродинамических характеристик (АДХ) различных компоновок тел при изменении угла атаки и угловой скорости закрутки потока. Выполнено сравнение с результатами эксперимента. На основании полученных результатов дана рекомендация по выбору компоновки для аппарата в форме затупленного цилиндра с двумя дисками.

Математическая модель; уравнения; модель турбулентности; неструктурированная сетка; сходимость; закрученный поток; угол атаки; угловая скорость; аэродинамические коэффициенты.

V.T. Kalugin, S.V. Strijhak

**PARAMETRIC INVESTIGATION OF AERODYNAMIC FORM OF PROBE
IN SWIRLING FLOW**

The goal of this work is the substantiation of a choice of optimal configuration for probe-device “Scanliner”. In the scope of this work numerical results are presented for the simulation of flow around device-probe with different assembling in swirling flow. Problem definition and com-

* Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.», ГК № 07.514.11.4119 от 02 ноября 2011 г.

puting methods are defined. The RANS equations are closed with $k - \omega$ SST turbulence model. The method of solution is based on finite method algorithm. The calculation of aerodynamic coefficients for various configurations of bodies is done with different angles of attack and angular speed rotation of flow. On the basis of received results the recommendation of selection optimal configuration for the device in the form of the blunted cylinder with two disks can be given.

Mathematical model; equations; turbulence model; unstructured meshes; swirling flow; angle of attack; rotation speed; aerodynamic coefficients.

Введение. Свободное программное обеспечение (СПО) предоставляет широкие возможности для решения задач механики сплошной среды. В работе авторами предпринята попытка использования и модификации программного стека на базе пакетов Salome-OpenFOAM-Paraview для решения практической задачи в области прикладной аэродинамики. Многие технические устройства функционируют в условиях закрученного несжимаемого турбулентного потока. Особенностью их обтекания является наличие скоса потока и неравномерность профиля продольной составляющей скорости. Это приводит к появлению боковых сил и колебаниям обтекаемых устройств относительно места крепления подвески. Диагностический комплекс “Сканлайнер” (рис. 1,а), разработанный для обследования внутренней поверхности дымоотводящих магистралей и движущийся в условиях закрученного потока газа, должен стабилизироваться и иметь амплитуду колебаний не более 5 градусов. На основе эксперимента и численного моделирования для обеспечения требуемой аэродинамической стабилизации была предложена форма с особыми управляющими и поверхностями – дисковыми стабилизаторами [1]. Целью работы является апробация расчетной модели, определение АДХ и выбор оптимальной формы компоновки аппарата-зонда.

1. Постановка задачи. Рассмотрена задача о моделировании течения для случая обтекания цилиндрического тела со стабилизаторами в закрученном дозвуковом потоке несжимаемого газа. Исследуемое тело представляет собой затупленный осесимметричный цилиндр с диаметром $d=34$ мм и длиной $l=186$ мм. Цилиндр может быть с одним или с двумя соосными дисками с диаметрами $D_1=160$, 136, 120, 100 мм и $D_2=102$ мм (рис. 1,б,в). Данное тело соответствует уменьшенной модели аппарата “Сканлайнер” и экспериментальной модели для определения АДХ в дозвуковой аэродинамической трубе Т-500 МГТУ им. Н.Э. Баумана и в установке “винт-кольцо”.

Расчетная область представляла собой цилиндр, в центре которой находилось исследуемое тело. Внешние границы расчетной области выбирались достаточно далеко от зон возмущения потока. Границы расчетной области удалены от “носка” исследуемого тела на 10 калибров вверх и вниз по потоку, диаметр расчетной области равен 10 калибрам. Расчеты были выполнены для числа Рейнольдса $2,0 \times 10^5$, которое соответствовало условиям эксперимента, проведенного в дозвуковой аэродинамической трубе [1]. В ходе исследования подготавливался расчетный пример. Задавались начальные и граничные условия. На входной границе задавались граничные условия: модуль вектора скорости с $U = 25$ м/с и условие для закрутки потока. Параметры для выбранной модели турбулентности рассчитывались исходя из степени турбулентности набегающего потока в 1 %, которая соответствовала экспериментальной. На стенке выполнялось условие непротекания. На выходной границе задавалось статическое давление, для остальных величин условия продолжения решения.

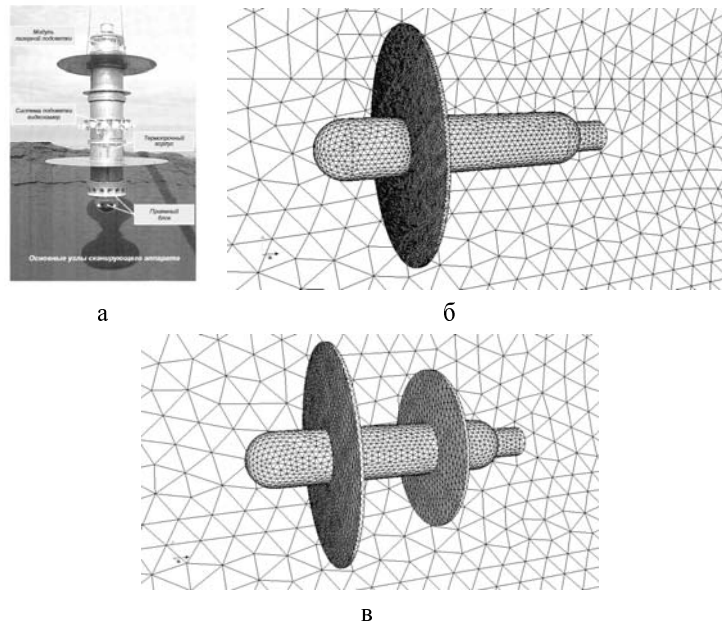


Рис. 1. Различные компоновки диагностического аппарата-зонда:
 а – аппарат “Сканлайнер”; б – цилиндр с одним диском; в – цилиндр с двумя дисками

2. Математическая модель. Для решения поставленной задачи авторами использовалось СПО. Пакет Salome использовался для построения геометрии и расчетной сетки. В пакете OpenFOAM выполнялось численное моделирование. Пакет Paraview использовался для визуализации результатов расчета. Математическая модель в решателе pisoFoam основана на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, которые замыкаются с помощью различных моделей турбулентности. В данной работе использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST Ментера с пристеночной функцией [2]. Обобщенное уравнение, отражающее законы сохранения и модель турбулентности, в интегральной форме может быть представлено как

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi \, d\Omega + \int_{\Omega} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} \, d\vec{S} = \int_{\Gamma} \Gamma \, \text{grad} \phi \cdot \vec{n} \, d\vec{S} + \int_{\Omega} q_{\phi} \, d\Omega$$

Здесь ϕ – обобщенная переменная, $\phi = \{1, u, v, w, k, \omega, h\}$; ρ – плотность; u, v, w – составляющие скорости вдоль оси $0x, 0y, 0z$; h – энтальпия; Ω – контрольный объем; \vec{V} – вектор скорости; \vec{S} – вектор площади; совпадающий по направлению с внешней нормалью; Γ – коэффициенты переноса; q_{ϕ} – источниковый член; k – турбулентная кинетическая энергия; ω – удельная скорость диссипации турбулентной энергии; $\frac{\partial}{\partial t}$ – полная производная по времени; \vec{n} – вектор нормали.

Основу расчетного метода составляет метод контрольного объема. Расчетная схема имела второй порядок точности по пространству и времени. Для расчета конвективного члена в уравнениях для $u, k, e, \omega, R, \vec{v}$ выбиралась схема Gauss Gamma, для расчета диффузионного члена использовалась схема Gauss linear corrected, для величин градиента скорости и давления схема Gauss linear. Использо-

лись неструктурированные сетки на базе тетраэдров. Максимальная сетка включала в себя около 1 млн узлов. Для решения полученных СЛАУ для $u, p, k, e, \omega, R, \tilde{\nu}$ использовался метод бисопряженных градиентов PBiCG (Preconditioned Biconjugate Gradient) с предобуславливателем DILU (Diagonal Incomplete LU), где $e, R, \tilde{\nu}$ – скорость диссипации турбулентной энергии, тензор рейнольдсовых напряжений, турбулентная вязкость [3]. Расчетный шаг по времени – 10^{-4} секунд. Общее время счета – 1–2 секунды. Значения невязок для $u, p, k, e, \omega, R, \tilde{\nu}$ равны 10^{-5} .

3. Результаты расчетов. В работе проведены расчеты для тел цилиндра с одним диском и с двумя дисками. Были определены АДХ и построены графики их зависимостей при изменении угла атаки. В ходе расчета проводился анализ значения y^+ и анализ влияния размерности сетки на значения C_x . Полученные АДХ показали, что цилиндр с одним диском является устойчивым относительно точки подвеса.

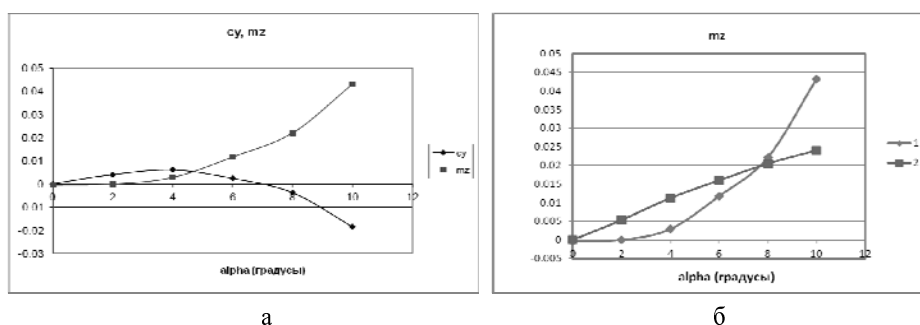


Рис. 2. Зависимость C_y и m_z от угла атаки

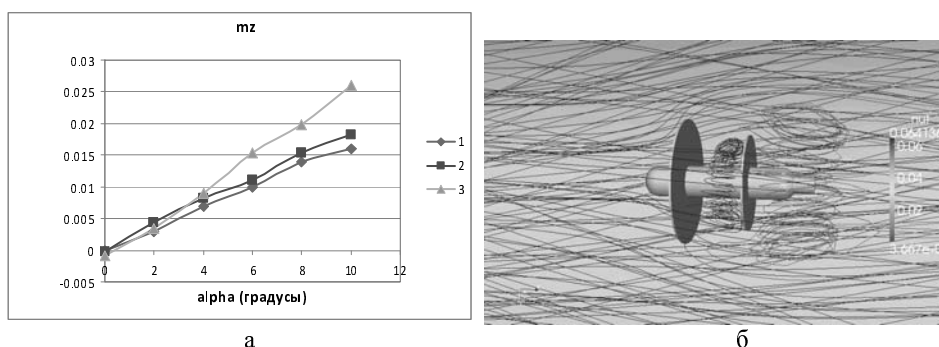


Рис. 3. Зависимость m_z для угла атаки и линии тока

Особенность возникла в диапазоне от 0 до 4 градусов. Зависимость $m_z(\alpha)$ близка к параболической (рис. 2,а). При наличии небольшого возмущения в случае закрутки возможно появление раскачки. Компоновка в форме цилиндра с двумя дисками устойчива во всем диапазоне углов от 0 до 10 градусов. Зависимость $m_z(\alpha)$ близка к линейной (рис. 2,б). Дополнительно проведены параметрические исследования. В ходе исследования менялось расположение заднего диска на цилиндре. Получены зависимости $m_z(\alpha)$, которые являлись практически линейными.

Максимальное значение $\frac{dm_z(\alpha)}{d\alpha}$ получено, когда диски находятся на максимальном расстоянии относительно друг друга (рис. 3,а). Между дисками формируется пространственный вихрь (рис. 3,б).

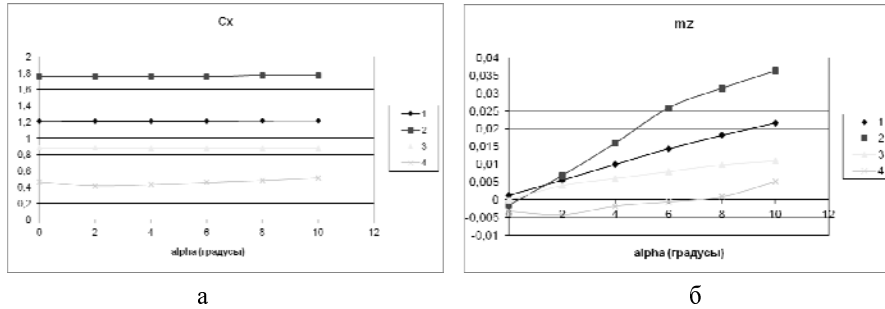


Рис. 4. Зависимость C_x и m_z от угла атаки

Проводились расчеты при изменении диаметра первого диска D_1 . Максимальные значения C_x , m_z получены для $D_1=160, 136$ мм (рис. 4). Для формирования закрутки потока на входе расчетной области использовалась специальная утилита. Закрутка потока задавалась по закону твердого тела. Рассматривались различные значения $\Omega_0=3, 10, 16, 24$ рад/с при фиксированном положении дисков $L_d=68$ мм. Оказалось, что закрутка существенно не влияет на значения АДХ для цилиндра с двумя дисками. Результаты расчета АДХ и данные экспериментов отличались на 5 %. Оптимальным вариантом с точки зрения аэродинамической стабилизации является компоновка аппарата-зонда при взаимном расположении дисков с диаметрами $D_1=136-160$ мм, $D_2=102$ мм на расстоянии $L_d=102$ мм. Расчеты выполнялись на кластерах ТТИ ЮФУ, Web-лаборатории UniHUB (www.unihub.ru) с использованием 16–64 ядер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин В.Т., Стрижак С.В., Суцев С.П. Аэродинамическая стабилизация диагностического комплекса “Сканлайнер” // Известия РАН. Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2006. – № 3. – С. 87-94.
2. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. – СПб.: БГТУ, 2001. – 107 с.
3. Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques // Computers in Physics. – 1998. – Vol. 12, № 6. – P. 620-631.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент А.Ю. Луценко.

Калугин Владимир Тимофеевич – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: kaluginvt@mail.ru; 107005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; тел.: 84992636385, факультет СМ; д.т.н.; профессор; декан.

Стрижак Сергей Владимирович – e-mail: strijhak@yandex.ru; факультет СМ; инженер.

Kalugin Vladimir Timoveefich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: kaluginvt@mail.ru; 5, 2 Baumanskaya street, Moscow, 107005; phone: +74992636385; college SM; dr. of eng. sc.; professor; dean.

Strijhak Sergej Vladimirovich – e-mail: strijhak@yandex.ru; college SM; engineer.