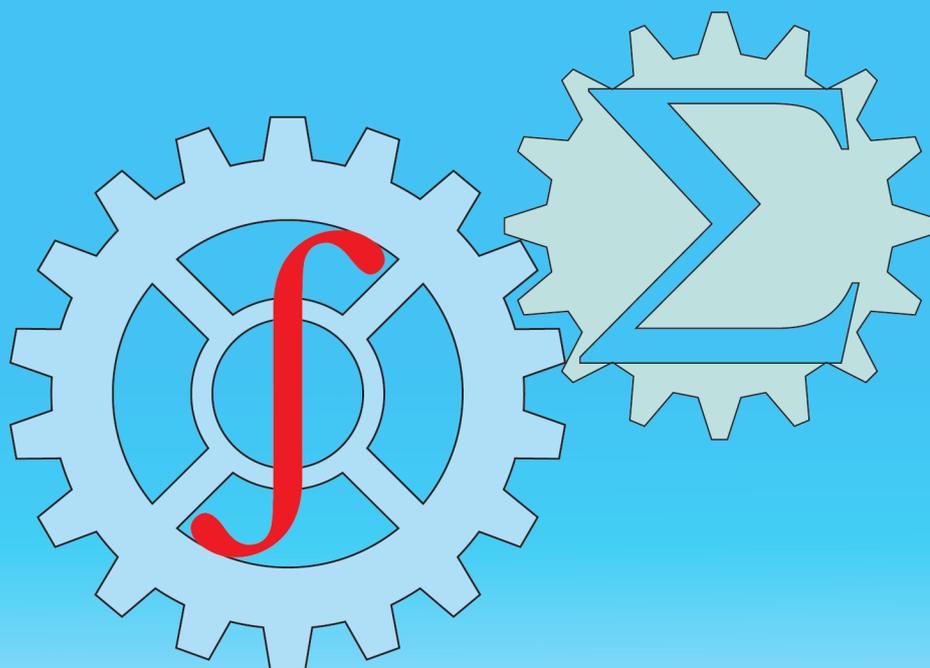




ISSN: 2010-7250  
Published from 1992

Институт механики и сейсмостойкости сооружений  
Mechanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti

# МЕХАНИКА МУАММОЛАРИ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ PROBLEMS OF MECHANICS



**2025**  
Volume 34  
No: 4

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI  
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

МЕХАНИКА  
МУАММОЛАРИ

O‘ZBEKISTON  
JURNALI

4  

---

2025

УЗБЕКСКИЙ  
ЖУРНАЛ

ПРОБЛЕМЫ  
МЕХАНИКИ

*Журнал под таким названием издается с января 1992 г.*

Ташкент – 2025

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор* – докт. физ.-мат. наук, проф. К.С. СУЛТАНОВ  
*Заместитель главного редактора* – докт. физ.-мат. наук Р.А. АБИРОВ  
*Заместитель главного редактора* – PhD Н.А. НИШОНОВ  
*Ответственный секретарь* – докт. тех. наук М.М. ХАМДАМОВ

Абдикаримов Р.А. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Мирсаидов М. д.т.н., проф., акад. АН РУз (Ташкент)
Абдусаттаров А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Мухаммадиев Д.М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Азимов Д. д.т.н., проф. (США)	Панахов Г.М. д.т.н., проф., член-корр. НАНА (Баку)
Алдошин Н.В. д.т.н., проф. (Москва)	Паровик Р. д.ф.-м.н. (Петропавловск-Камчатский)
Алимухамедов Ш.П. д.т.н., проф. (Ташкент)	Ризаев А.А. д.т.н., проф. (Ташкент)
Ахмедов А.Б. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Сагдиев Х.С. к.т.н. (Ташкент)
Бахадиров Г.А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Сирожиддинов З. д.т.н., проф. (Самарканд)
Быковцев А.С. д.ф.-м.н., проф. (США)	Старовойтов Э.И. д.ф.-м.н. (Гомель, Беларусь)
Ватин Н.И. д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)	Тохилов Ш.М. к.ф.-м.н. (США)
Дусматов О.М. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)	Тухтакузиев А.Т. д.т.н., проф. (Ташкент)
Зубарев А.Ю. д.ф.-м.н., проф. (Екатеринбург)	Юлдашев Ш.С. д.т.н., проф. (Наманган)
Исмоилова С.И. д.т.н., проф. (Ташкент)	Худайкулиев Р.Р. к.т.н. (Ташкент)
Казанцев С.П. д.т.н., проф. (Москва)	Хужаев И.К. д.т.н., проф. (Ташкент)
Кузнецов С.В. д.ф.-м.н., проф. (Москва)	Хужаёров Б.Х. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)
Маликов З.М. д.т.н., проф. (Ташкент)	Хусанов Б.Э. д.т.н. (Ташкент)
Мамасаидов М.Т. д.т.н., проф., акад. НАН КР (Ош)	Шардаков И.Н. д.ф.-м.н., проф. (Пермь)
Мардонов Б.М. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Эргашов М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Матвеев В.П. д.т.н., проф., акад. РАН (Пермь)	Ювмитов А.С. д.т.н., с.н.с. (Ташкент)

### *Адрес редакции:*

*100125, Ташкент, Академгородок, Дурмон йули, 40.  
Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз*

*Телефон: +99855 520-02-45  
+99855 520-04-46*

*E-mail: instmechofficial@gmail.com*

*Технический редактор: Михайлова В.В.*

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006 г.  
Регистрационный номер 0050.

Номер одобрен на заседании редакционной коллегии журнала 25.12.2025  
Сдано в набор 15.12.2025. Подписано в печать 29.12.2025.  
Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Гарнитура Times New Roman. Ризография.  
Усл.- печ. л. 6.5. Уч.-изд. л. 6.82. Тираж 130.  
Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО “Munis design group”:  
100170, г. Ташкент, ул. Буз-2, презд, дом 17-А.

- [3] *Лышевский А.С.* Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками, Новочеркасск, 1961.
- [4] *Розанова Н.Н., Янгиев А.А.* Кинематические характеристики закрученного потока в цилиндрическом и конфузорных участках отводящего водовода высоконапорного вихревого шахтного водосброса // Труды М. ТМИ, 1990.
- [5] *Рахматулин Х.А.* Основы газовой динамики взаимодействующих движений сплошных сред // ПИММ. 1956, Т. 20, №2, стр. 184-195.
- [6] *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред, часть 1. 1978, 464 с.
- [7] *Хамидов А.А., Худайкулов С.И.* Теория смеси вязких жидкостей. Ташкент, Фан, 2003, 140 с.

Дата поступления  
20.09.2025

***Xudayqulov S., Kaniev J., Abduvakhobov A. Dispers aralashmalar turbulent oqimlar bilan o'zaro ta'sirlashganda ko'p fazali to'liqlar va ularning qo'llanilishi.***

***Annotatsiya.*** Dispers aralashmaning yarim cheksiz silindrik quvurdan boshqa dispers aralashma ichida (kichik qo'zg'alishli) tarqalish masalasi ko'tarilgan. Har ikkala qatlamdagi dispers aralashmalar tezliklar va bosimlar taqsimoti olinadi.

***Kalit so'zlar:*** dispers aralashma, ikki fazali oqim, kichik buzilishlar usuli, oqim barqarorligi, rahmatulin modeli, fazalararo chegara tebranishlari.

***Khudaykulov S., Kaniev J., Abduvakhobov A. Multiphase waves in the interaction of dispersed mixtures with turbulent flows applications.***

***Abstract.*** The distribution of small disturbances during the flow of a dispersed mixture from a semi-infinite pipe into a submerged space containing another dispersed mixture is examined. Velocity and pressure distributions in both dispersed mixture flows are obtained.

***Keywords:*** dispersed mixture, two-phase flow, small disturbance method, flow stability, rakhmatulin model, interphase oscillations.

УДК. 532

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ 3D КРЫЛА ONERA M6 НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ SA И SST**

**Мадалиев М.Е.**

*Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан*

*E-mail: Madaliev.me2019@mail.ru, m.e.madaliyev@ferpi.uz*

***Аннотация.*** В статье представлено исследование моделей турбулентности SA и SST в пакете программ Comsol Multiphysics для задачи обтекания стреловидного крыла с профилем ONERA M6 на участках размаха с углом атаки 3,06 градусов и числом Маха  $M_\infty=0.84$ . В работе для численной реализации уравнений турбулентности использован метод конечных элементов. Для стабилизации дискретизированных уравнений использована стабилизация по методу наименьших квадратов Галеркина. Полученные результаты сопоставлены с результатами экспериментальных данных. Результаты модели турбулентности SA показали лучшую сходимость с экспериментальными данными, чем модель SST.

***Ключевые слова:*** уравнения Навье–Стокса, отрывное течение, модель SST, модель SA, Comsol Multiphysics, NASA.

**Введение.** В современном мире моделирование аэродинамических характеристик играет важную роль в разработке и оптимизации различных летательных аппаратов. Одним из ключевых инструментов в этой области является использование компьютерных программ для создания трехмерных моделей и проведения численного анализа. В данном контексте особое внимание привлекает 3D модель крыла ONERA M6, разработанная Французским национальным центром аэрокосмических исследований (ONERA). ONERA M6 является одним из наиболее широко используемых стреловидных крыльев в аэродинамическом сообществе для проверки и сравнения различных численных методов и программных средств [1–5]. Ее особенность заключается в сложной геометрии, которая включает в себя комбинацию угловых и криволинейных поверхностей. Эта модель предоставляет уникальную возможность проверить точность и эффективность методов расчета аэродинамических характеристик [6–8].

Для проведения численного анализа аэродинамических характеристик модели ONERA M6 широко применяются различные методы вычислений, включая метод конечных объемов (Finite Volume Method, FVM) [9], метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [10], метод конечных разностей (Finite Difference Method, FDM) [11] и другие. Однако, в последние годы наибольшее внимание уделяется методам высокого порядка точности, таким как метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) на основе па-

кета программ Comsol Multiphysics. Применение методов высокого порядка позволяет достичь более точных результатов при моделировании сложных аэродинамических потоков вокруг модели ONERA M6, что особенно важно при анализе турбулентных режимов движения. Эти методы также обладают высокой эффективностью и могут значительно сократить время вычислений по сравнению с традиционными подходами. Важным аспектом численного анализа является также верификация и валидация результатов. Это включает в себя сравнение численных данных с экспериментальными измерениями и результатами других независимых расчетов, а также оценку чувствительности результатов к различным параметрам моделирования. Для исследования обтекания стреловидного крыла с профилем ONERA M6 была использована программа Comsol Multiphysics.

Comsol Multiphysics – это мощная инженерная программа, предназначенная для моделирования и анализа различных физических процессов во многих областях науки и техники. Включая в себя широкий спектр модулей и инструментов, Comsol Multiphysics позволяет инженерам и исследователям создавать комплексные модели, объединяющие различные физические явления [11]. Для аэродинамических и гидродинамических расчетов, в том числе, для моделирования течений вокруг объектов, таких как модель ONERA M6, Comsol Multiphysics предоставляет инструменты для решения уравнений Навье-Стокса, уравнений Эйлера и других уравнений, описывающих поведение жидкости или газа. Одним из преимуществ Comsol Multiphysics является его гибкость и возможность интеграции различных физических моделей и уравнений, что позволяет создавать комплексные и многофизические модели, учитывающие взаимодействие различных физических процессов. Такой подход особенно полезен при исследовании сложных аэродинамических явлений и оптимизации формы объектов.

Цель данной статьи заключается в исследовании моделей турбулентности SA и SST для задач течения турбулентного потока вокруг аэродинамического профиля ONERA M6 на участках размаха с углом атаки  $3.06$  градусов и числом Маха  $M_\infty=0.84$ . Полученные численные результаты сравниваются с известными экспериментальными данными, представленными на веб-сайте NASA Turbulence Modeling Resource (TMR) [12] и в других работах [1–5].

**Физическая и математическая постановка задачи.** Крыло ONERA M6 представляет собой широко используемый трехмерный тестовый пример для проверки численных методов и моделей турбулентности для трансзвуковых течений. Поле течения рассчитывается при числе Маха набегающего потока  $0.84$ , угле атаки  $3.06^\circ$  и числе Рейнольдса набегающего потока  $14.6 \times 10^6$ . Неструктурированная сетка, используемая при моделировании, состоит из  $5\,696\,979$  ячеек, а минимальный нормализованный шаг сетки до стены составляет  $1.5 \times 10^{-5}$ . На рис. 1а показан крупный план крыла ONERA M6, а на рис. 1б показан общий вид геометрической области и граничные условия [12].

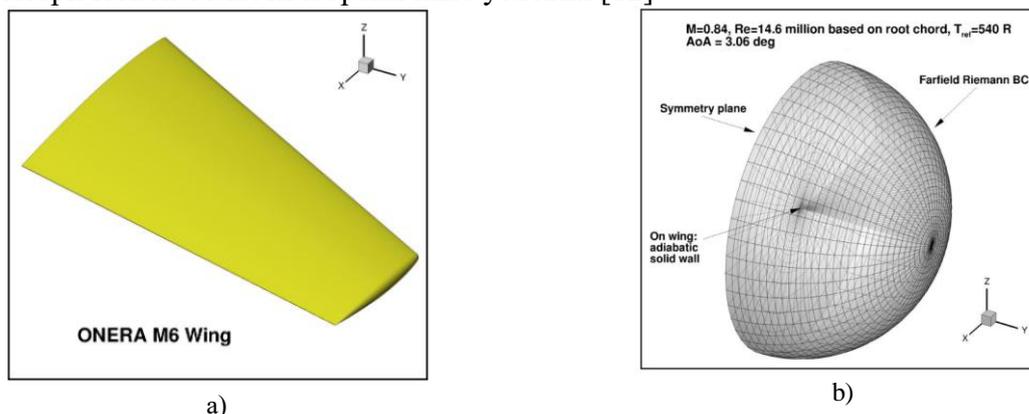


Рис. 1. Общий вид геометрической области и граничные условия крыла ONERA M6

**Математическая модель.** Для решения этой задачи использовались уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу. Уравнения Навье-Стокс представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение несжимаемой жидкости:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{u}_i$  - компоненты среднего скоростного поля,  $\bar{p}$  - среднее давление,  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\tau_{ij}$  - компоненты тензора напряжений,  $\rho$  - плотность. Первое уравнение описывает изменение скорости жидкости с течением времени, под действием внешних сил, вязкости и давления. Второе уравнение - уравнение неразрывности - гарантирует сохранение массы жидкости. Для замыкания уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, в контексте моделей турбулентности, используются дополнительные уравнения или соотношения, которые описывают эффекты турбулентности на осредненные поля.

**Модели турбулентности.** Модель турбулентности SA (Spalart-Allmaras) [13–15] является одной из наиболее распространенных и простых моделей для предсказания турбулентных потоков. Она была разработана Ф. Спалартом и Э. Альмарасом в 1992 году и получила широкое применение в инженерной практике. Основная идея модели SA заключается в том, что она использует одно уравнение для предсказания переменной  $\tilde{\nu}$ , которая является аналогом кинематической вязкости  $\nu$  в модели  $k$ - $\epsilon$ . Это уравнение представляет собой транспортное уравнение для вязкости турбулентности  $\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}$ , где  $f_{v1}$  - функция, корректирующая турбулентную вязкость.

Уравнение турбулентной вязкости в модели SA выглядит следующим образом:

$$(\mathbf{U} \cdot \nabla) \tilde{\nu} = C_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} - C_{w1} f_w \left( \frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma_v} \nabla \cdot [(v + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}] + \frac{1}{\sigma_v} C_{b2} \nabla \tilde{\nu} \nabla \tilde{\nu}. \quad (2)$$

Модель SA хорошо подходит для моделирования различных типов турбулентных потоков, включая пристенные и отрывные потоки. Она показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными и обладает относительной простотой в настройке и использовании, что делает её популярным выбором для инженерных расчетов.

Модель переноса касательных напряжений Ментера (SST) [16–17] является комбинацией моделей  $k$ - $\epsilon$  и  $k$ - $\omega$ . Для пристеночного слоя используется  $k$ - $\omega$ , для внешнего региона –  $k$ - $\epsilon$ . В настоящее время эта модель является очень популярной и входит во многие пакеты программ по вычислительной гидродинамике.

$$\begin{cases} (\mathbf{U} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot [(v + \sigma_k \nu_t) \nabla k] + P - \beta^* \omega k, \\ (\mathbf{U} \cdot \nabla) \omega = \nabla \cdot [(v + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega] + \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla \omega \nabla k. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $k$  – удельная турбулентная кинетическая энергия ( $\text{м}^2 \text{с}^{-2}$ ),  $\omega$  – удельная скорость турбулентной диссипации ( $\text{с}^{-1}$ ). Остальные значения представлены в работах [16].

**Метод решения.** Для стандартных моделей турбулентности SA и SST были использованы стандартные решатели COMSOL Multiphysics. Все вычисления проводились на компьютере с восьмиядерным процессором Intel i7-1100HQ, тактовой частотой 3.2 ГГц, 32 ГБ оперативной памяти DDR3, жестким диском объемом 1024 ГБ и операционной системой Windows 7 (64-разрядная). Время вычислений для модели SA составило 22 часа 20 минут, а для модели SST – 28 часов 40 минут.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** Установившееся решение на крыле визуализируется через поверхностный график числа Маха с контурами давления, как показано на рис. 2. В обеих моделях заметно слияние двух слабых скачков по размаху крыла.

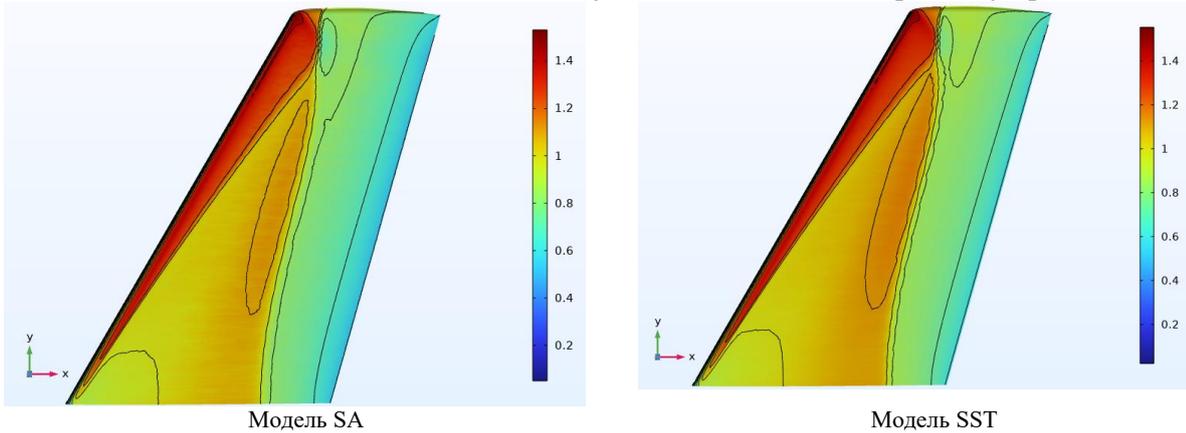


Рис. 2. Поверхностный график числа Маха с контурами давления для двух моделей

На рис. 3 показано изменение температуры на поверхности верхней части крыла.

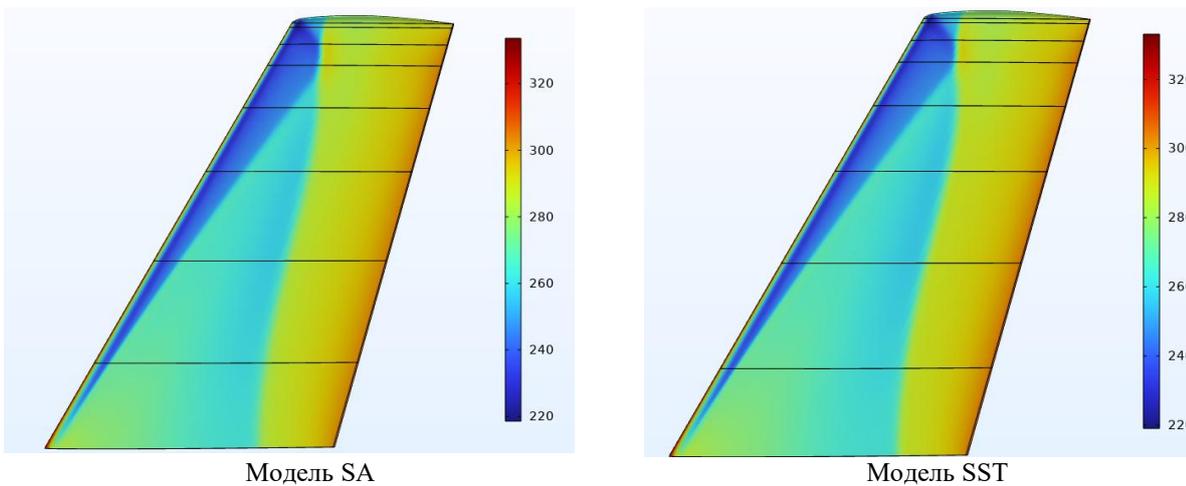


Рис. 3. Поверхностная температура.

Как видно из рис. 3, разница температур между передней и задней поверхностями крыла составляет 100К.

На рис. 4 представлены изолинии скорости в сечении крыла при  $Y/B = 0.65$ .

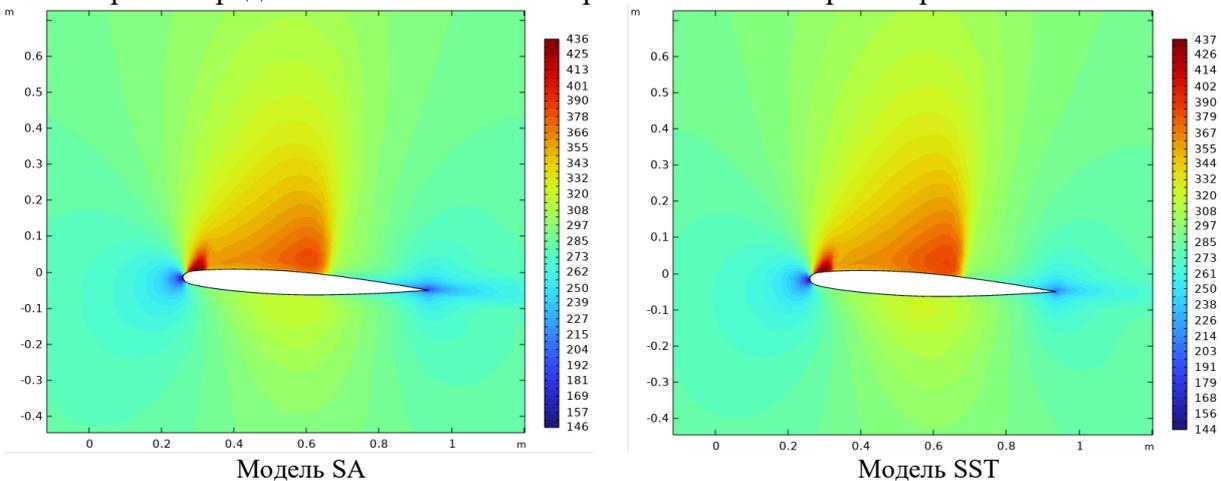


Рис. 4. Изолинии скорости в сечении крыла при  $Y/B = 0.65$ .

Валидность моделирования обеспечивается сравнением с экспериментами коэффициента давления (рис.5), определяемого выражением

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5\rho U_0^2},$$

где  $p$  - давление в точке на поверхности профиля,  $p_\infty$  - давление свободного потока,  $\rho$  - плотность свободного потока,  $U_0$  - скорость свободного потока.

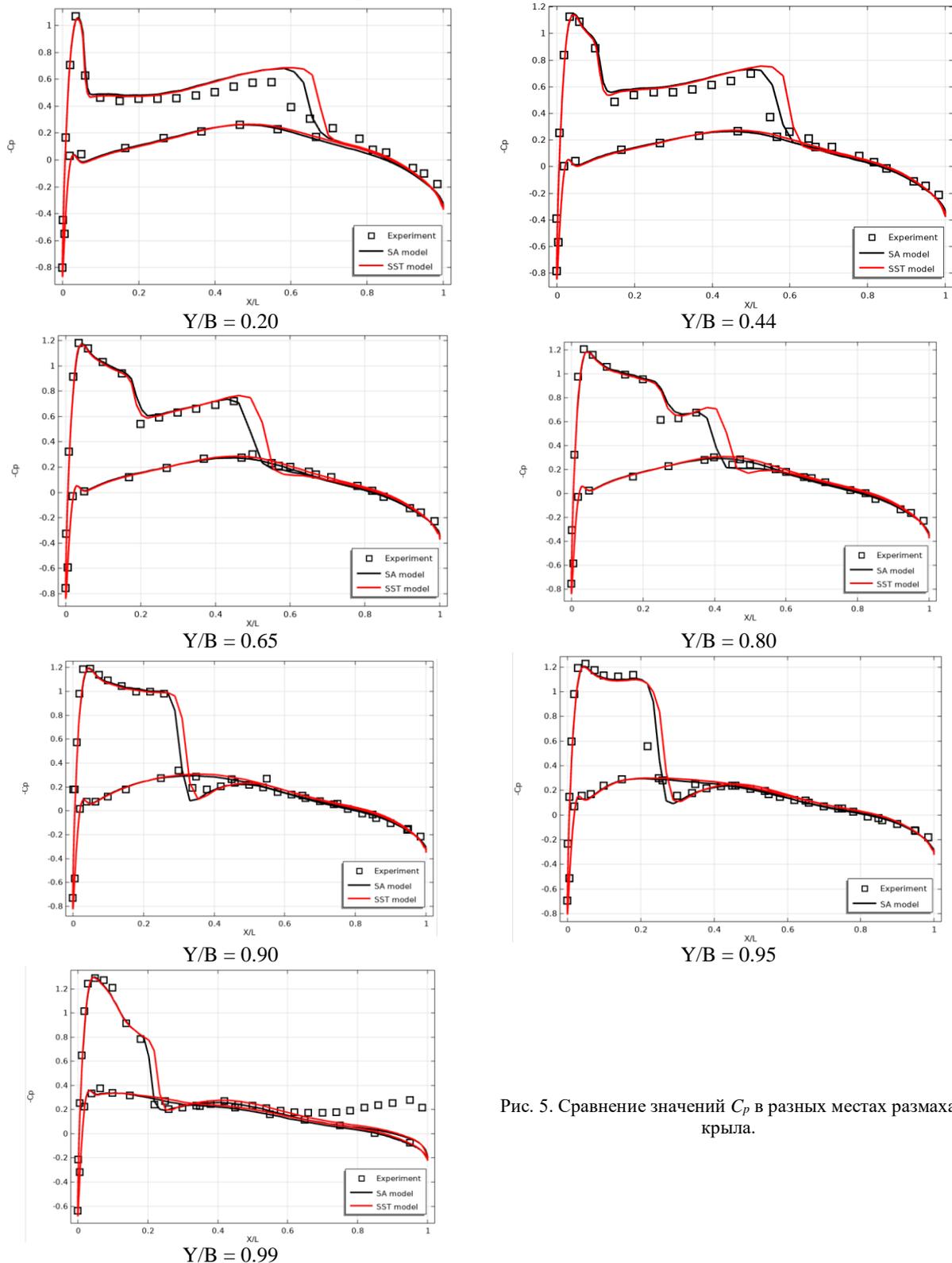


Рис. 5. Сравнение значений  $C_p$  в разных местах размаха крыла.

Как видно из рис. 5, результаты обеих моделей достаточно близки друг к другу, основное отличие заключается в расположении ударной волны на верхней поверхности крыла. Из полученных результатов видно, что результаты модели SA ближе к экспериментальным данным, чем результаты модели SST.

**Заключение.** В ходе данного исследования были проведены численные расчеты аэродинамических характеристик модели ONERA M6 с использованием стандартных моделей турбулентности SA и SST в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Результаты показали, что обе модели демонстрируют сходные результаты, однако имеют различия в распределении ударной волны на верхней поверхности крыла. Из анализа полученных данных следует, что модель SA обеспечивает более близкие к эксперименту результаты, особенно в отношении расположения ударной волны. Это свидетельствует о более высокой точности модели SA при предсказании аэродинамических явлений в данной конфигурации. Таким образом, на основе проведенного исследования можно сделать вывод о преимуществе модели SA перед моделью SST в контексте аэродинамического моделирования ONERA M6. Однако, необходимо отметить, что выбор модели турбулентности может зависеть от конкретных условий задачи и требований к точности результатов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение анализа других моделей турбулентности и их сравнение с экспериментальными данными для различных условий потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Harris Ch. D.* NASA supercritical airfoils : a matrix of family-related airfoils / Ch. D. Harris. – Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center. 1990,74 p.
- [2] *Ivanova A. V., Kuzmin A. G.* Non-uniqueness of the transonic flow past an airfoil // *Fluid Dynamics*. 2004, Vol. 39, No. 4, pp. 642–648
- [3] *Schmitt V., Charpin F.* Pressure distributions on the ONERA-M6-wing at transonic Mach numbers // *Experimental Data Base for Computer Program Assessment : Report of the Fluid Dynamics Panel Working Group 04*. – Neuilly-sur-Seine, France : Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1979, Chapter B1, pp. B1-1–B1-44.
- [4] *Menter F. R., Kuntz M., Langtry R.* Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc. 2003, pp. 625 - 632.
- [5] *Mayeur J., Dumont A., Destarac D., Gleize V.* RANS simulations on TMR test cases and M6 wing with the Onera elsA flow solver // *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (AIAA SciTech Forum 2016)*, San Diego, California, USA, 4–8 January 2016. – Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2016, 31 p.
- [6] *Hart P.L., Schmitz S.* Drag decomposition using partial-pressure fields: ONERA M6 wing // *AIAA Journal*. 2022, Vol. 60, No. 5, pp. 2941–2952.
- [7] *Kuzmin A.* On the lambda-shock formation on ONERA M6 wing // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014, Vol. 9, No. 20, pp. 7029–7038.
- [8] *Nilsson S., Yao H. D., Karlsson A., Arvidson S.* Effects of viscosity and density on the aeroelasticity of the ONERA M6 wing from subsonic to supersonic speeds // *AIAA AVIATION 2022 Forum*, Chicago, Illinois & Online, 27 June–1 July 2022. – Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2022, 18 p.
- [9] *Eymard R., Gallouët T., Herbin R.* Finite volume methods // *Handbook of Numerical Analysis*. – Amsterdam: Elsevier. 2000, Vol. 7: Numerical Methods for Fluids (Part 3) / ed. by P. G. Ciarlet, J. L. Lions, pp. 713–1018.
- [10] *Dhatt G., Lefrançois E., Touzot G.* Finite element method. London : ISTE Ltd ; Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc. 2012, 610 p.
- [11] *Moczo P., Kristek J., Halada L.* The finite-difference method for seismologists. An Introduction. Bratislava: Comenius University. 2004, 161 p.
- [12] *Turbulence Modeling Resource/ Langley Research Center Turbulence Modeling Resource; NASA.*
- [13] *Spalart P.R., Allmaras S.R.* A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, 6–9 January 1992. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1992, 22 p.
- [14] *Spalart P. R.* Trends in turbulence treatments // *Fluids 2000 Conference and Exhibit*, Denver, CO, USA, 19–22 June 2000. – Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2000, 19 p.
- [15] *Spalart, P.R., Rumsey, C. L.* Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations // *AIAA Journal*. 2007, Vol. 45, No. 10, pp. 2544-2553.
- [16] *Menter F. R.* Zonal two-equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows // *24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, FL, USA, 6–9 July 1993. – Reston, VA: AIAA. 1993, 21 p.

Дата поступления  
20.09.2025

#### **Madaliyev M.E. SA va SST turbulent modeli asosida onera M6 3D qanotining sonli tahlili.**

**Annotatsiya.** Maqolada Comsol Multiphysics dasturiy ta'minot paketida SA va SST turbulentlik modellarining tadqiqoti keltirilgan. Ushbu tadqiqot hujum burchagi 3,06 gradus va Mach soni  $M_\infty=0,84$  bo'lgan sharoitda ONERA M6 profilli kamon shaklidagi qanotni aylanib o'tish masalasini o'rganishga qaratilgan. Ishda turbulentlik tenglamalarini sonli yechish uchun chekli elementlar usulidan foydalanilgan. Diskretlangan tenglamalarni barqarorlashtirish maqsadida Galyorkinning eng kichik kvadratlar usuli qo'llanilgan. Olingan natijalar tajriba ma'lumotlari bilan taqqoslangan. Tahlil shuni ko'rsatdiki, SA turbulentlik modeli SST modeliga nisbatan tajriba natijalari bilan yaxshiroq muvofiqlikka erishgan.

**Kalit so'zlar:** Nave-Stoks tenglamalari, uzulishli oqim, SST modeli, SA modeli, Comsol Multiphysics, NASA.

*Madaliev M.E. Numerical analysis of 3D ONERA M6 Wing using the SA and SST turbulence models.*

**Abstract.** This article presents a study of the SA and SST turbulence models implemented in the COMSOL Multiphysics software for analyzing the flow around a swept wing with the ONERA M6 Wing profile. The finite element method is employed for the numerical implementation of the turbulence equations. To stabilize the discretized equations, the Galerkin least squares method is utilized. The results obtained from the simulations are compared with experimental data. The findings indicate that the SA model shows better agreement with experimental data than the SST turbulence model.

**Keywords:** Navier–Stokes equations, separated flow, SST model, SA model, Comsol Multiphysics, NASA.

УДК 532.5:612.7

## ДИНАМИКА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ТУЯМУЮНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Яхшибаев Д.С.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий,  
Ташкент, Узбекистан

E-mail: d.yaxshibayev@tuit.uz

**Аннотация.** Рассматриваются разные критерии динамической устойчивости стратифицированных потоков Туямуюнского водохранилища, связанные с водоснабжением тепловых электростанций. Для рационального использования водохранилища-охладителя требуется знание условий, при которых плотностная стратификация устойчива, а также степени перемешивания потоков разной плотности в случае нарушения этих условий. Рассматривается расчет селективного водозабора и определение условий динамической устойчивости стратифицированных потоков.

**Ключевые слова:** Туямуюнское водохранилище, стратифицированные потоки, динамическая устойчивость, селективный водозабор, плотностная стратификация, теплоэлектростанция, перемешивание потоков.

Воды Туямуюнского водохранилища имеют разные плотности. При их слиянии наблюдаются стратифицированные потоки, т.е., наблюдается плотностное расслоение жидкости. Оно влияет на формирование пространственных течений, а также в значительной степени определяет охлаждающую способность водохранилища.

Для решения ряда задач, связанных с водоснабжением тепловых электростанций, рациональное использование водохранилища-охладителя требует знания условий, при которых плотностная стратификация устойчива, а также степени перемешивания потоков разной плотности в случае нарушения этих условий. Так, при расчете селективного водозабора одной из основных задач является определение условий динамической устойчивости стратифицированных потоков и определение вида стратификации, так как только при наличии плотностного расслоения жидкости, возможно осуществлять селективный и, в частности, глубинный забор воды.

Критерии динамической устойчивости стратифицированных потоков. Изучению динамической устойчивости стратифицированных потоков посвящены работы Тейлора, Гольдштейна, Келлеганна, Харлемана, Уи, Лофквиста, Макагно и Рауза, Нетюхайло и других.

Теоретическое исследование динамической устойчивости обычно основывается на методах теории возмущений. Применительно к изучению динамической устойчивости стратифицированных потоков эти методы сводятся к основным: методу малых колебаний, энергетическому методу и методу многофазной жидкости, где в рассматриваемых жидкостях происходит взаимодействие фаз, которое приводит ограничивающий слой к возмущению.

Гольдштейн [1] исследовал условия динамической устойчивости стратифицированных потоков в двух случаях, отличающихся один от другого распределением плотности по глубине.

Область устойчивости, по Гольдштейну, в первом случае определена графиком

$$h = f(\sigma), \text{ где } h = \frac{\varepsilon gh}{u_1^2}, \sigma = 2kh \quad (1)$$

здесь  $\varepsilon$  - относительная плотность;  $1/h = u_1^2/\varepsilon gh$  - плотностное число Фруда ( $Fr'$ );  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  - длина волны поверхности раздела.

## СОДЕРЖАНИЕ

K.C.Султанов, М.М.Мирсаидов, А.Нуьмонов, З.Уразмухамедова. Напряженное состояние Кызылсайской грунтовой плиты под действием статических нагрузок .....	3
М.К.Усаров, Д.К.Шамсиев, Ф.А.Усанов. Продольные колебания многоэтажного здания с пространственным фундаментом на основе континуальной пластинчатой пространственной модели .....	11
З.Сирожидинов, Х.А.Гуломова. Вероятностно-статистический анализ результатов испытаний прочности бетона.....	21
К.Мамасолиев, Э.А.Исмоилов. Математическое моделирование продольно-радиальных колебаний трансверсально-изотропных цилиндрических оболочек, нестационарно взаимодействующих с внутренней вязкой жидкостью.....	30
Ш.И.Норматов. Определение минимального коэффициента устойчивости откосов грунтовых плотин методом кругло-цилиндрической поверхности скольжения с применением автоматизированного алгоритма нахождения центра окружности.....	38
А.Э.Кудратов. Устойчивость упругого стержня с гасителями колебаний при поперечных колебаниях.....	47
Ф.А.Усанов. Оценка напряженно-деформированного состояния пластины под действием касательных нагрузок на основе бимоментной теории.....	54
Б.Х.Хужаёров, Ж.Р.Туйгунов. Задача аномальной фильтрации жидкости в кусочно-неоднородной пористой среде.....	60
С.Худайкулов, Ж.Каниев, А.Абдувахобов. многофазные волны при взаимодействии дисперсных смесей с турбулентными потоками и их применение.....	71
М.Е.Мадалиев. Численный анализ 3d крыла Onera M6 на основе моделей турбулентности SA и SST.....	76
Д.С. Яхшибаев. Динамика перемешивания стратифицированных потоков туямуянского водохранилища.....	82
Т.Р.Пулатов, Ж.А.Умрзоков. Математическое моделирование движения жидкости в гидроаккумуляторе гидрорекуперационной тормозной системы.....	86
Г.А.Юсупходжаева, Д.С.Бекчанова. Технология по производству смесовой пряжи из вторичных отходов натурального шелка.....	91
Ш.Т.Равутов. Обоснование параметров зубчатого привода хлопкоуборочного аппарата, оснащенного малогабаритными эллиптическими барабанами .....	96
О.С. Норкузиев. Расчетный анализ процесса съема хлопка со шпинделей хлопкоуборочных машин.....	103
Л.Э.Турсунбоев. Определение сил реакции опор прижимного устройства шлифовальной машины.....	110
Абдукаримов А., Рахмонов Х.Н. Синтез комбинированных зубчато-рычажных дифференциальных передаточных механизмов.....	117
Д.М.Мухаммадиев, Х.А.Ахмедов, Б.Х.Примов, О.Х.Абзоиров. Экспериментальное исследование привода пильного волоконотделителя с семяотводящим устройством.....	130

## MUNDARIJA

K.S.Sultanov, M.M.Mirsaidov, A.Nu'monov, Z.Urazmuhamedova. Qizilsoy gruntli to'g'onining statik kuchlar ta'sirida kuchlanishini baholash.....	3
M.K.Usarov, F.A.Usanov, D.K.Shamsiyev. Kontinual plastinali fazoviy model asosida fazoviy poydevorga ega ko'p qavatli binoning bo'ylama tebranishlari .....	11
Z.Sirojiddinov, X.A.Gulomova. Beton mustahkamligi sinovlari natijalarining ehtimollik-statistik tahlili.....	21
K.Mamasoliyev, E.A.Ismoilov. Ichki qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvchi transversal-izotrop silindrik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlarini matematik modellashtirish .....	30
Sh.I. Normatov. Aylana markazini avtomatlashtirilgan aniqlash algoritmini qo'llab, gruntli to'g'on qiyaliklari ustuvorligini minimal ustuvorlik koeffitsiyentini doiraviy-silindrik siljish sirti usuli bilan aniqlash .....	38
A.E. Kudratov. Dinamik so'ndirgichlar o'rnatilgan elastik sterjenning ko'ndalang tebranishlari ustuvorligi.....	47
F.A. Usanov. Bimoment nazariyasi asosida urinma yuklar ta'siridagi plastinaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholash.....	54
B.Xujayorov, J.R.Tuyg'unov. Bo'lakli bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suyuqliklarning anomal sizish masalasi.....	60
S.Xudayqulov, J.Kaniev, A.Abdurahobov. Dispers aralashmalar turbulent oqimlar bilan o'zaro ta'sirlashganda ko'p fazali to'lqinlar va ularning qo'llanilishi.....	71
M.E. Madaliyev. SA va SST turbulent modeli asosida Onera M6 3D qanotining sonli tahlili .....	76
D.S. Yaxshiboyev Tuyamuyun suv omboridagi qatlamli oqimlar dinamika aralashishi.....	82
J.A.Umrzoqov, T.R. Pulatov. Hidroreperativ tormoz tizimidagi gidroakkumulyator ichidagi suyuqlik harakatini matematik modellashtirish .....	86
G.A.Yusupxodjayeva, D.S.Bekchanova. Tabiiy ipakning ikkilamchi chiqindilaridan aralash yigirilgan ip ishlab chiqarish texnologiyasi .....	91
Sh.T. Ravutov. Kichik gabaritli elliptik barabanlar bilan jihozlangan paxta terish apparati tishli yuritmasi parametrlarini asoslash ...	96
O.S.Norqo'ziyev. Paxta terim mashinalarining shpindel yuzasidagi paxta o'ramidan tozalash jarayonining hisobiy tahlili.....	103
L.E. Tursunboyev. Jilvirlash mashinasi uzatuvchi qurilmasining tayanchlaridagi reaksiya kuchlarini tadqiq qilish.....	110
A.Abdukarimov, X.N. Raxmonov. Kombinatsiyalangan tishli-richagli differensial uzatish mexanizmlarini sintez qilish.....	117
D.M.Muhammadiyev, H.A.Axmedov, B.X.Primov, O.X. Abzoirov. Chigiti chiqaruvchi qurilmali arrali tola ajratgich harakat uzatish tizimining eksperimental tadqiqoti.....	130