

Рис. 2. Интерферограммы фазовых сред в полосах конечной и бесконечной ширины

приписываем каждой последующей точке, в которой середина новой темной полосы пересекает штриховую линию. А номера 0,5; 1,5; 2,5;... - каждой точке, в которой штриховая линия пересекает середины светлых полос.

Для любой точки интерферограммы в полосах конечной ширины, в том случае, если известны номера соответствующих полос, оптическая разность хода вычисляется по формуле (7).

**Выводы.** Дешифровка интерферограмм предполагает наличие опорных полос, положение которых можно использовать в качестве реперных координат. В данной работе предлагается получать систему опорных полос на двухэкспозиционных голографических интерферограммах, наклоняя между экспозициями предметный или опорный пучок на небольшой угол. Отсчет интерференционных полос ведется от первой полосы, следующей за опорными полосами. Такой подход позволяет устранить неопределенность значения фазы, а значит исключить неоднозначность дешифровки сложных голографических интерферограмм.

### Список литературы

1. Исмаилов Д. А. Голографическая память на основе синтезированных голограмм / Д.А. Исмаилов и др.// Проблемы современной науки и образования.-2016.-№17(59).-С. 6-9.
2. Исманов Ю. Х. Методы рентгеновской голографии с внутренним источником/ Ю. Х. Исманов, Д. А.Исмаилов // Наука, техника и образование.- 2016. № 3(21). С.19-22.
3. Исманов Ю. Х.Формирование последовательности саморепродукций одномерной линейной решеткой/ Ю. Х Исманов, Д. А Исмаилов, С. А. Алымкулов // Academy. 2016. № 6(9). С. 6-10.
4. Исманов Ю. Х., Исмаилов Д. А., Алымкулов С. А. Моделирование в голографии с использованием второго опорного пучка/ Ю. Х. Исманов, Д. А. Исмаилов, С. А. Алымкулов // Academy. 2016. № 6(9). С. 10-13.

УДК 532.517.4

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

*Жайнаков Амаебек Жайнакович, д.ф.м.н., профессор, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: [jainakov-41@mail.ru](mailto:jainakov-41@mail.ru)*

*Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, д.ф.м.н., профессор ОшГУ, Кыргызстан, 723500, г.Ош, ул. Ленина 331, e-mail: [kurbanaliev@rambler.ru](mailto:kurbanaliev@rambler.ru)*  
*Калева Анара Колбаевна, стар. преп., БатГУ, Кыргызстан, 715100, г. Баткен, ул. Жусупова 21, e-mail: [kaleeva77@mail.ru](mailto:kaleeva77@mail.ru)*

Цель статьи – демонстрация возможностей различных моделей турбулентности открытого пакета OpenFOAM для расчета коэффициентов подъемной силы и сопротивления при обтекании двумерного аэродинамического крыла несжимаемым потоком. В данной работе проведено численное моделирование процесса обтекания профилей FX 79-W-151A и NACA 63-430. Рассматривались осредненные по Рейнольдсу две модели турбулентности  $k-\omega$  SST и  $kkl-\omega$ . Достоверность полученных численных результатов сравнивались с соответствующими экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** турбулентность, переходное течение, обтекание крыла, моделирование, метод контрольных объемов, численный расчет, открытый пакет, OpenFOAM

## MODELING OF LAMINAR AND TURBULENT INCOMPRESSIBLE FLOWS USING OPENFOAM

*Jainakov Amanbek Jainakovich, Academician, D.p.m.s., Professor, Kyrgyzstan, 720044, с. Bishkek, KSTU named after I.Razzakov e-mail: [jainakov-41@mail.ru](mailto:jainakov-41@mail.ru)*

*Kurbanaliev Abdikerim Irisbaievch, D.p.m.s., Professor, Kyrgyzstan, 723500, с. Osh, OshSU, Lenina street 331, e-mail: [kurbanaliev@rambler.ru](mailto:kurbanaliev@rambler.ru)*

*Kaleeva Anara Kolbaevna, Star. Prep., BatSU, Jusupova street-21, e-mail: [kaleeva77@mail.ru](mailto:kaleeva77@mail.ru)*

The aim of this work is to evaluate the prediction capabilities of the different turbulence models available in OpenFOAM for calculating of lift and drag coefficients during the two-dimensional incompressible wing flow. The wing flow around airfoils FX 79-W-151A and NACA 63-430 was numerically modeled in this paper. Two Reynolds averaged models of turbulence  $k-\omega$  SST and  $kkl-\omega$  are considered in this work. The validity of the numerical results was verified by comparison with the corresponding experimental data.

**Keywords:** turbulence, transient flow, flow around the wing, modeling, control volume method, numerical calculation, the open package, OpenFOAM.

В настоящее время, энергия ветра является очень важным источником возобновляемой и экологически чистой энергии. Как известно, увеличение выходной энергии ветровой турбины приводит к росту линейных размеров ветрогенераторов, что связано с последующими дополнительными техническими и экономическими затратами. Поэтому, как нам представляется, для того, чтобы увеличить максимальную выходную энергию ветрогенератора, необходимо оптимизировать имеющие решающие значения аэродинамические свойства лопастей ветровых турбин. Оптимальная конструкция лопастей при данных значениях скорости ветра приводит к увеличению крутящего момента и аэродинамического качества ветрогенератора, в результате чего естественно снижается себестоимость выходной энергии.

Благодаря бурному развитию быстродействующих вычислительных комплексов и методов численного решения нелинейных взаимосвязанных интегро-дифференциальных уравнений, математическое моделирование в данное время является одним из эффективных методов исследований в различных областях науки и техники. По этой причине математическое моделирование сильно дополняет физический эксперимент, даже в некоторых случаях подменяет его. Поэтому методы математического моделирования

являются наиболее результативными методами решения сложных взаимосвязанных систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных при рассмотрении задач оптимизации аэродинамических свойств ветрогенераторов.

В работе проведено численное моделирование процесса обтекания профилей FX 79-W-151A и NASA 63-430 широко используемых в ветрогенераторах, стационарным потоком несжимаемой вязкой жидкости. Моделирование проведено путем численного решения уравнений Навье-Стокса с помощью утилити simpleFOAM пакета OpenFOAM 4.0 [5]. Учет турбулентных пульсаций на осредненное течение базировался на  $k-\omega$  SST модели Ментора[3]  $kkl-\omega$  модели Уолтерс и Соклжат[6].

Математическая модель задачи основана на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса [2, стр.293]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

где  $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  - тензор вязких напряжений связанный с молекулярной вязкостью,  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  - напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. Замыкание этой систем уравнений проводится при помощи вышеуказанных двух моделей турбулентности.

Дискретизация расчетной области получается методом контрольных объемов [4, стр.39]. Использование разностной схемы против потока для конвективных и Gauss linear схемы для диффузионных членов дает необходимую точность численных вычислений. Численное решение связанных через давление стационарных уравнений основывалось на методе SIMPLE [2, стр.176] с числом корректоров 3.

Расчетная сетка создана при помощи встроенный утилити blockMesh и представлена на рис. 1. Сгущение сетки проводилось вокруг профиля спереди, сзади и по обеим продольным верхней и нижней поверхностям профиля.

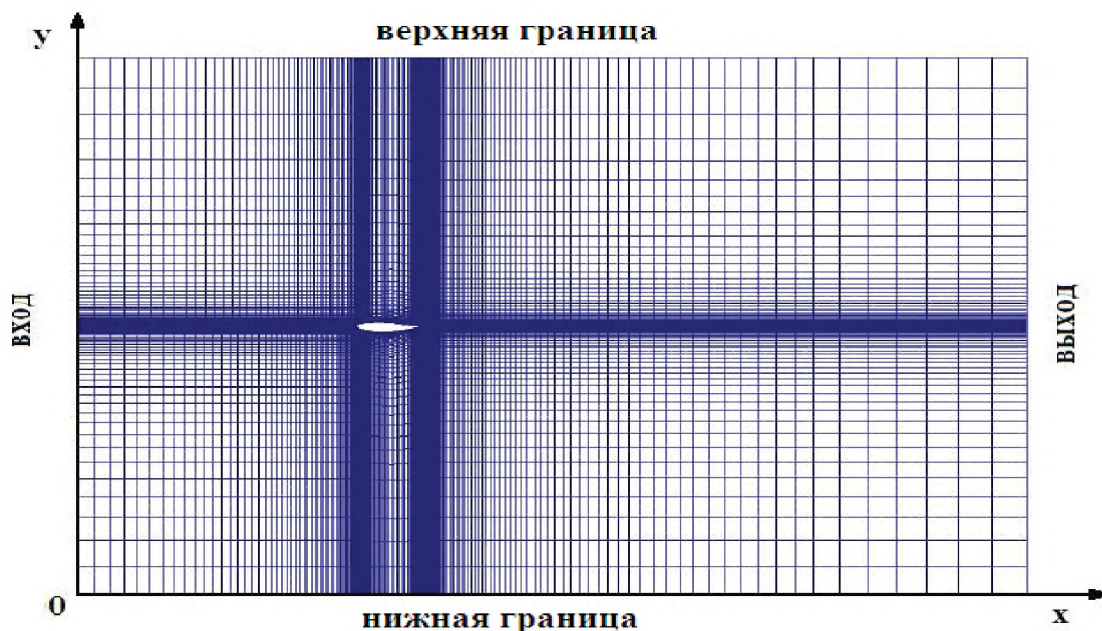


Рис. 1. Расчетная сетка и границы.

Полученная таким образом расчетная сетка имеет 5 границ – вход, выход, верхняя, нижняя и соответственно твердая, непроницаемая стенка самого профиля.

На твердых стенках расчетной области задано условие прилипания, что дает условие равенства нулю всех компонентов вектора скорости. Для давления задано условие Неймана, энергии турбулентности  $k$  и других характеристик турбулентного течения граничные условия задавались при помощи аппарата пристеночных функций [2, стр. 298-299]. На правой границе заданы условия Неймана для скорости, а давление полагалось равным 0. На входной границе задавалось условие Неймана для давления. Продольная скорость была равна скорости свободного потока, а поперечная равна 0. Для исключения влияния выходных граничных условий на поток положение этой границы в поперечном направлении простиралась на расстоянии 25 длины хорды, а в продольном направлении около 30 длины хорды.

Так как в работе использовались две разные модели турбулентности для них соответственно рассматривались разные расчетные сетки. Для  $k-\omega$  SST модели сетка строилась таким образом, что безразмерное расстояние от стенки  $y^+$  было больше 150, что позволило избежать чрезмерного измельчения сетки около твердых границ и использовать аппарат пристеночных функций при постановке граничных условий. Для  $kkl-\omega$  модели  $y^+ \approx 1$ , что делает неприменимым метод пристеночных функций.

Некоторые данные о граничных условиях, расчетной сетки и решателя для профилей FX 79-W-151A и NACA 63-430 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Условия моделирования для профиля FX 79-W-151A.

Величина	Значение	
	$k-\omega$ SST модель	$kkl-\omega$ модель
Число ячеек	127122	1150632
$y^+$	$\approx 150$	$\approx 1$
Число Рейнольдса	700000	700000
Интенсивность турбулентности	1 %	1 %
Скорость свободного потока	10,5 м/с	10,5 м/с

Таблица 2

Условия моделирования для профиля NACA 63-430

Величина	Значение	
	$k-\omega$ SST модель	$kkl-\omega$ модель
Число ячеек	127122	524378
$y^+$	$\approx 150$	$\approx 1$
Число Рейнольдса	1500000	1500000
Интенсивность турбулентности	1 %	1 %
Скорость свободного потока	24 м/с	24 м/с

Как было сказано выше, нами использовались две модели турбулентности. Первая  $k-\omega$  SST модель относится к двухпараметрическим дифференциальным моделям турбулентности. Она сочетает в себе сильные стороны  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  – моделей и обеспечивает необходимый плавный переход от  $k-\omega$  – модели в пристеночной области к  $k-\varepsilon$  – модели вдали от стенки. Вторая  $kkl-\omega$  – модель турбулентности использует три уравнения переноса для ламинарной кинетической энергии  $kL$ , турбулентной кинетической энергии  $kT$  и величины, которая определяет специфический масштаб течения  $\omega$ .

Результаты численных расчетов для коэффициентов подъемной силы и сопротивления для рассмотренных профилей FX 79-W-151A и NACA 63-430 при различных углах атаки приведены на рис. 2-5.

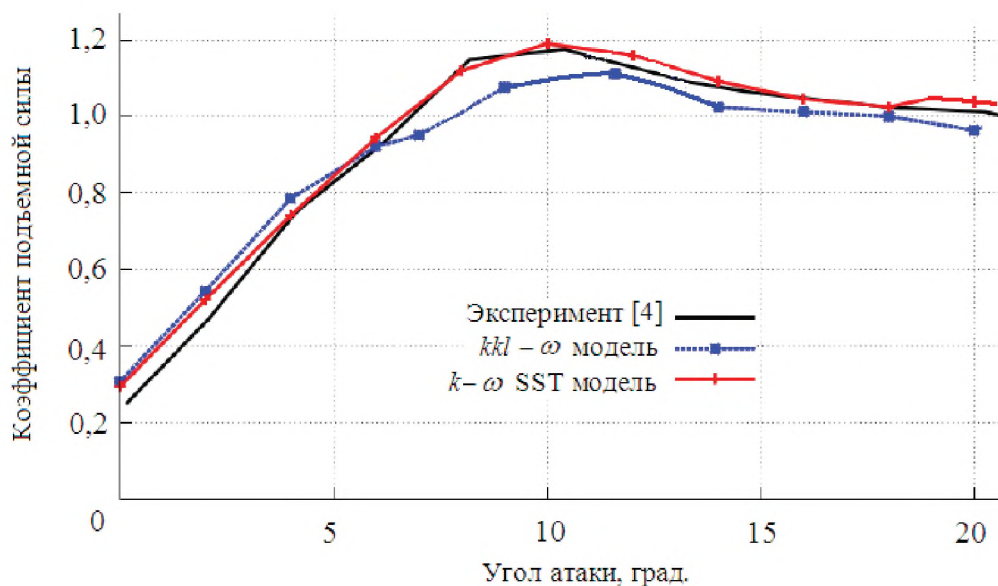


Рис. 2. Коэффициент подъемной силы для FX 79-W-151A

Первая используемая  $k - \omega$  SST модель турбулентности применима для развитых турбулентных течений, что позволяет снести граничные условия со стенок на первый от стенки узел. Из рис. 2, 4 и 5 видно что эта модель количественно и качественно по сравнению с другой моделью лучше согласуется со соответствующими данными работ [1,4].

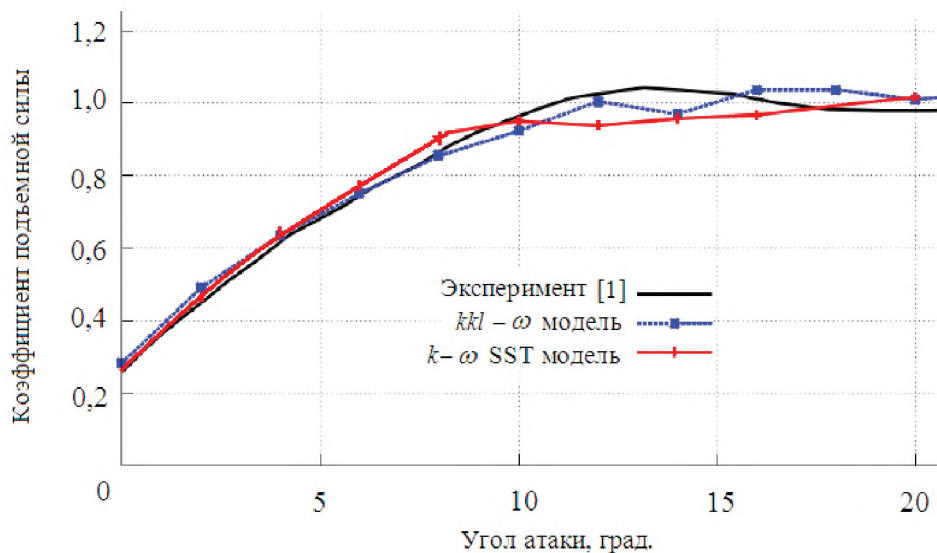


Рис. 3. Коэффициент подъемной силы для NACA 63-430

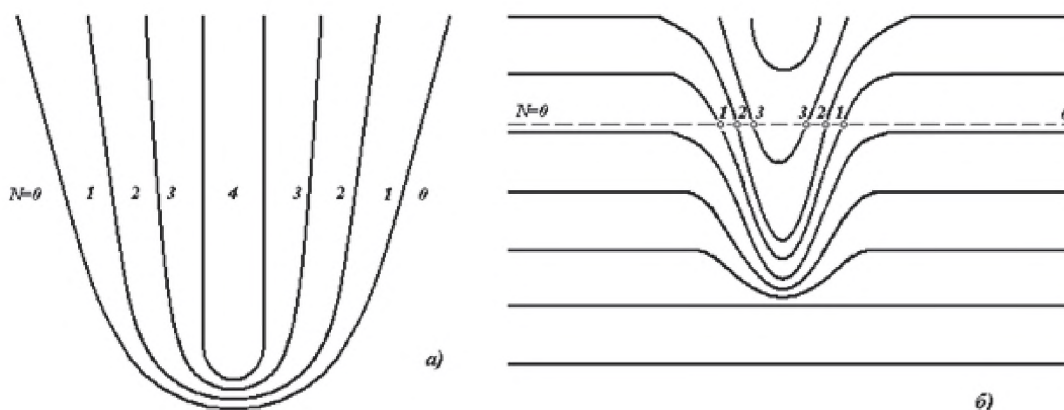


Рис. 2. Интерферограммы фазовых сред в полосах конечной и бесконечной ширины

приписываем каждой последующей точке, в которой середина новой темной полосы пересекает штриховую линию. А номера 0,5; 1,5; 2,5;... - каждой точке, в которой штриховая линия пересекает середины светлых полос.

Для любой точки интерферограммы в полосах конечной ширины, в том случае, если известны номера соответствующих полос, оптическая разность хода вычисляется по формуле (7).

**Выводы.** Дешифровка интерферограмм предполагает наличие опорных полос, положение которых можно использовать в качестве реперных координат. В данной работе предлагается получать систему опорных полос на двухэкспозиционных голографических интерферограммах, наклоняя между экспозициями предметный или опорный пучок на небольшой угол. Отсчет интерференционных полос ведется от первой полосы, следующей за опорными полосами. Такой подход позволяет устранить неопределенность значения фазы, а значит исключить неоднозначность дешифровки сложных голографических интерферограмм.

#### Список литературы

1. Исмаилов Д. А. Голографическая память на основе синтезированных голограмм / Д.А. Исмаилов и др.// Проблемы современной науки и образования.-2016.-№17(59).-С. 6-9.
2. Исманов Ю. Х. Методы рентгеновской голографии с внутренним источником/ Ю. Х. Исманов, Д. А.Исмаилов // Наука, техника и образование.- 2016. № 3(21). С.19-22.
3. Исманов Ю. Х.Формирование последовательности саморепродукций одномерной линейной решеткой/ Ю. Х Исманов, Д. А Исмаилов, С. А. Алымкулов // Academy. 2016. № 6(9). С. 6-10.
4. Исманов Ю. Х., Исмаилов Д. А., Алымкулов С. А. Моделирование в голографии с использованием второго опорного пучка/ Ю. Х. Исманов, Д. А. Исмаилов, С. А. Алымкулов // Academy. 2016. № 6(9). С. 10-13.

УДК 532.517.4

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

*Жайнаков Амаебек Жайнакович, д.ф.м.н., профессор, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: [jainakov-41@mail.ru](mailto:jainakov-41@mail.ru)*

*Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, д.ф.м.н., профессор ОшГУ, Кыргызстан, 723500, г.Ош, ул. Ленина 331, e-mail: [kurbanaliev@rambler.ru](mailto:kurbanaliev@rambler.ru)*

*Калева Анара Колбаевна, стар. преп., БатГУ, Кыргызстан, 715100, г. Баткен, ул. Жусупова 21, e-mail: [kaleeva77@mail.ru](mailto:kaleeva77@mail.ru)*

Цель статьи – демонстрация возможностей различных моделей турбулентности открытого пакета OpenFOAM для расчета коэффициентов подъемной силы и сопротивления при обтекании двумерного аэродинамического крыла несжимаемым потоком. В данной работе проведено численное моделирование процесса обтекания профилей FX 79-W-151A и NACA 63-430. Рассматривались осредненные по Рейнольдсу две модели турбулентности  $k-\omega$  SST и  $kkl-\omega$ . Достоверность полученных численных результатов сравнивались с соответствующими экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** турбулентность, переходное течение, обтекание крыла, моделирование, метод контрольных объемов, численный расчет, открытый пакет, OpenFOAM

## MODELING OF LAMINAR AND TURBULENT INCOMPRESSIBLE FLOWS USING OPENFOAM

*Jainakov Amanbek Jainakovich, Academician, D.p.m.s., Professor, Kyrgyzstan, 720044, c.Bishkek, KSTU named after I.Razzakov e-mail: [jainakov-41@mail.ru](mailto:jainakov-41@mail.ru)*

*Kurbanaliev Abdikerim Irisbaievch, D.p.m.s., Professor, Kyrgyzstan, 723500, c. Osh, OshSU, Lenina street 331, e-mail: [kurbanaliev@rambler.ru](mailto:kurbanaliev@rambler.ru)*

*Kaleeva Anara Kolbaevna, Star. Prep., BatSU, Jusupova street-21, e-mail: [kaleeva77@mail.ru](mailto:kaleeva77@mail.ru)*

The aim of this work is to evaluate the prediction capabilities of the different turbulence models available in OpenFOAM for calculating of lift and drag coefficients during the two-dimensional incompressible wing flow. The wing flow around airfoils FX 79-W-151A and NACA 63-430 was numerically modeled in this paper. Two Reynolds averaged models of turbulence  $k-\omega$  SST and  $kkl-\omega$  are considered in this work. The validity of the numerical results was verified by comparison with the corresponding experimental data.

**Keywords:** turbulence, transient flow, flow around the wing, modeling, control volume method, numerical calculation, the open package, OpenFOAM.

В настоящее время, энергия ветра является очень важным источником возобновляемой и экологически чистой энергии. Как известно, увеличение выходной энергии ветровой турбины приводит к росту линейных размеров ветрогенераторов, что связано с последующими дополнительными техническими и экономическими затратами. Поэтому, как нам представляется, для того, чтобы увеличить максимальную выходную энергию ветрогенератора, необходимо оптимизировать имеющие решающие значения аэродинамические свойства лопастей ветровых турбин. Оптимальная конструкция лопастей при данных значениях скорости ветра приводит к увеличению крутящего момента и аэродинамического качества ветрогенератора, в результате чего естественно снижается себестоимость выходной энергии.

Благодаря бурному развитию быстродействующих вычислительных комплексов и методов численного решения нелинейных взаимосвязанных интегро-дифференциальных уравнений, математическое моделирование в данное время является одним из эффективных методов исследований в различных областях науки и техники. По этой причине математическое моделирование сильно дополняет физический эксперимент, даже в некоторых случаях подменяет его. Поэтому методы математического моделирования