

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2016 М.М. Цыбина

Ульяновский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 21.10.2016

В данной статье рассматриваются программные средства подготовки сетки конечных элементов для проведения математического моделирования внешнего обтекания различных зондовых средств восприятия воздушных давлений, а также приведены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования.

Ключевые слова: сетка конечных элементов, коммерческие программы, open-source программы, экспериментальные исследования, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современное инженерное проектирование трудно представить без инструментов для решения задач моделирования течения жидкости и газа. В подобных программных продуктах лидирующее положение занимает метод конечных объемов (МКО), который заключается в том, что расчетная область разбивается на элементарные объемы, и дифференциальное уравнение в краевой задаче заменяется интегральными балансными соотношениями для каждого из этих объемов. После этого интегралы в соотношениях аппроксимируются с использованием значений искомой функции в узлах сетки или значений производных искомой функции, взятых из краевых условий. В результате получается система линейных алгебраических уравнений, решением которой является вектор значений искомой функции в узлах сетки. Данный метод отличается точностью и устойчивостью решения.

По сравнению с реальным экспериментом математическое моделирование можно выполнить в гораздо сжатые сроки, а получаемые результаты дают полную картину физического процесса в любой точке исследуемого объекта.

Далее будут рассмотрены программы подготовки сетки конечных элементов как часть автоматизации процесса проведения математического моделирования приемников воздушных давлений (ПВД) и других зондовых средств восприятия воздушных давлений [1], а также приведены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования с применением как коммерческих, так и open-source программ.

ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для получения результатов математического моделирования с приемлемой точностью требуется соблюдать определенный порядок действий с учетом проведенных ранее исследований. Проведение математического моделирования чаще всего можно свести к следующим этапам:

- подготовка геометрической модели;
- подготовка сетки конечных элементов;
- подготовка расчетной модели;
- проведение расчета;
- анализ результатов.

Безусловно, на каждом этапе свои требования и критерии получаемого результата, но в данной работе наибольший интерес представляет этап подготовки сетки конечных элементов. Для вычислительной газодинамики одним из наиболее важных критериев является разрешение вязкого подслоя для правильного моделирования пограничного слоя у стенок обтекаемого объекта (так называемый параметр y^+ является показателем качества сетки в пограничном слое, значения которого приблизительно соответствуют вязкому подслою $y^+ < 3$, логарифмическому слою $30 < y^+ < 300$). При создании тетраэдральной сетки наибольшее распространение получил способ создания призматического слоя для моделирования пограничного слоя.

ОБЗОР СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Как правило, коммерческие проекты (например, Ansys [2]) интегрируют в своем составе всё больше средств моделирования, и становятся универсальными, хотя еще встречаются узкоспециализированные, которые имеют возможность сопряжения с аналогичными программами, например, FlowVision [3]. Для open-source проектов характерна также узкая специализация,

Цыбина Мария Михайловна, аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы».
E-mail: masha_dubinina.73@mail.ru

даже мощный инструмент OpenFOAM [4] нацелен только на выполнение расчетов.

Рассмотрим по очереди наиболее распространенных представителей из классов коммерческих и открытых программ.

Пример реализации сетки в программе FlowVision с адаптацией по поверхности исследуемого тела представлен на рис. 1.

Отличительной особенностью этой программы является уникальная технология «подсеточного» разрешения, где каждый элемент сетки, пересекающийся с моделируемым объектом, представляет собой сложный геометрический объект. Кроме того, есть возможность адаптации сетки (т.е. деление на более мелкие элементы) в зависимости от требуемых параметров.

Аналогично работает инструмент snappyHexMesh из состава OpenFoam, который также создает прямоугольную сетку конечных элементов, которую затем адаптирует под моделируемый объект. Пример сетки конечных элементов с призматическими слоями, созданной при помощи утилиты snappyHexMesh, приведен на рис. 2.

Следует отметить, что чаще всего open-source проекты нацелены на опытных пользователей, которые практически не замечают отсутствия графического, интуитивно-понятного интерфейса. Все настройки для создания сетки с помощью snappyHexMesh записаны в текстовом файле, созданную сетку можно посмотреть лишь с помощью сторонней программы, например, Paraview.

Ниже на рис. 3 и 4 приведены тетраэдраль-

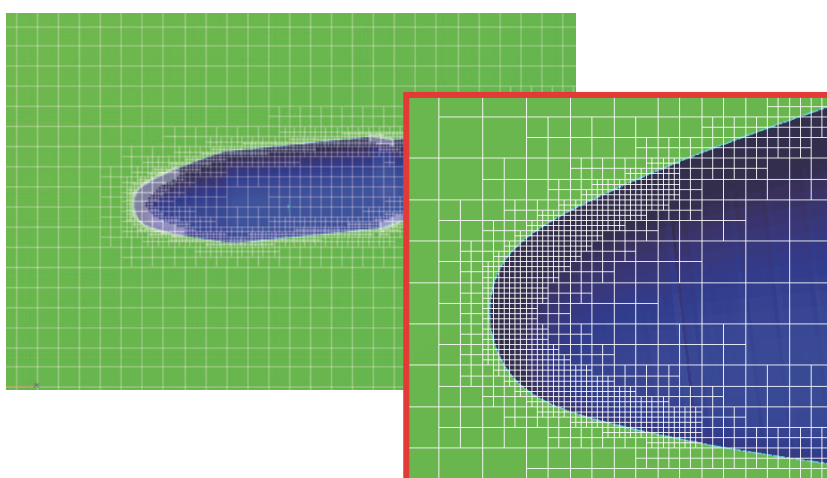


Рис. 1. Реализация сетки в FlowVision с адаптацией по поверхности

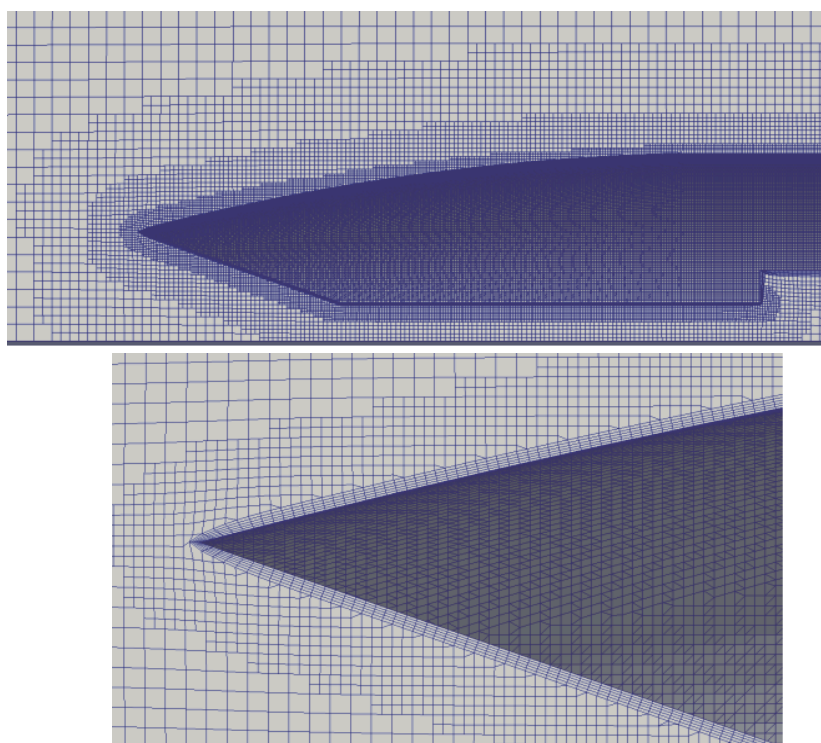


Рис. 2. Реализация сетки конечных элементов с призматическим слоем, подготовленная с помощью snappyHexMesh

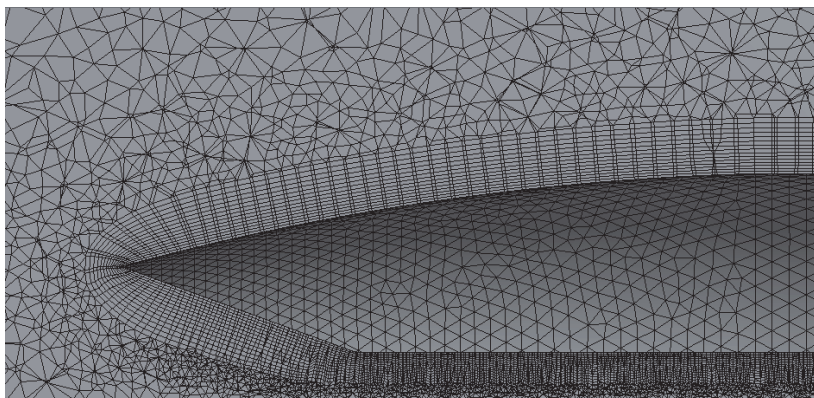


Рис. 3. Реализация сетки конечных элементов с призматическим слоем в Ansys

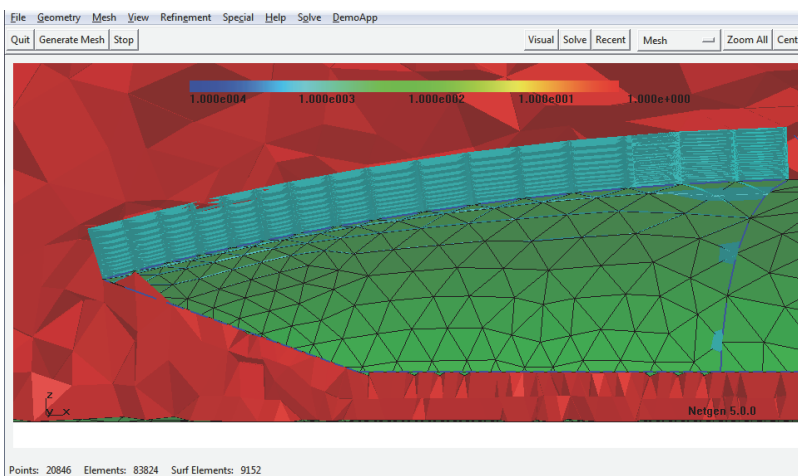


Рис. 4. Реализация сетки конечных элементов с призматическим слоем в NetGen

ные сетки с призматическими слоями (высота призматических слоев увеличена для наглядности), подготовленные Ansys [2] и NetGen [5] соответственно.

Таким образом, предлагаемые подходы построения сетки конечных элементов одинаковы как в свободно-распространяемых программах (NetGen, EnGrid, Salome, gsmh и т. д.), так и в коммерческих программах (Ansys, Abaqus, Cosmos и т. д.).

Безусловно, при проведении математического моделирования обязательным является исследование на сеточную сходимость, т.е. чем меньше размер конечных элементов, тем точнее результат. Но на практике уменьшение размеров конечных элементов ведет к увеличению размерности сетки, и возникают вопросы потребления оперативной памяти и вычислительных ресурсов. Кроме того, на точность получаемых результатов влияет и выбор модели турбулентности [6-8].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКА ВОЗДУШНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Применение программ FlowVision и OpenFoam и оценку результатов математического моделирования рассмотрим на примере исследований приемника воздушных давлений с компенсационным контуром в виде гофриро-

ванной поверхности. Исследуемый приемник приведен на рис. 5.

В аэродинамической лаборатории АО «УКБП» проведены экспериментальные исследования ПВД с компенсационным контуром в виде гофрированной поверхности. В одном случае отбор давления производился с помощью 8 отверстий диаметром 1.5 мм, в другом случае отбор производился щелью шириной 0.5 мм, имеющей вид кругового сектора. В обоих случаях использовались сменные насадки профилированного участка. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей от 50 до 200 км/ч.

Математическое моделирование спектра обтекания рассматриваемого приемника проводилось на базе технологической платформы UniHUB [9]. При моделировании использовались модели турбулентности Shear Stress Transport (SST) и Spalart-Allmaras (SA). Параметры набегающего потока воздуха были следующими: давление невозмущенного потока – 101325 Па, температура равна +15°C, степень турбулентности потока – 1%. Можно отметить, что в силу отсутствия достоверных данных по величине турбулентности потока аэродинамической трубы при математическом моделировании принята низкая турбулентность набегающего потока.

Проведено математическое моделирование

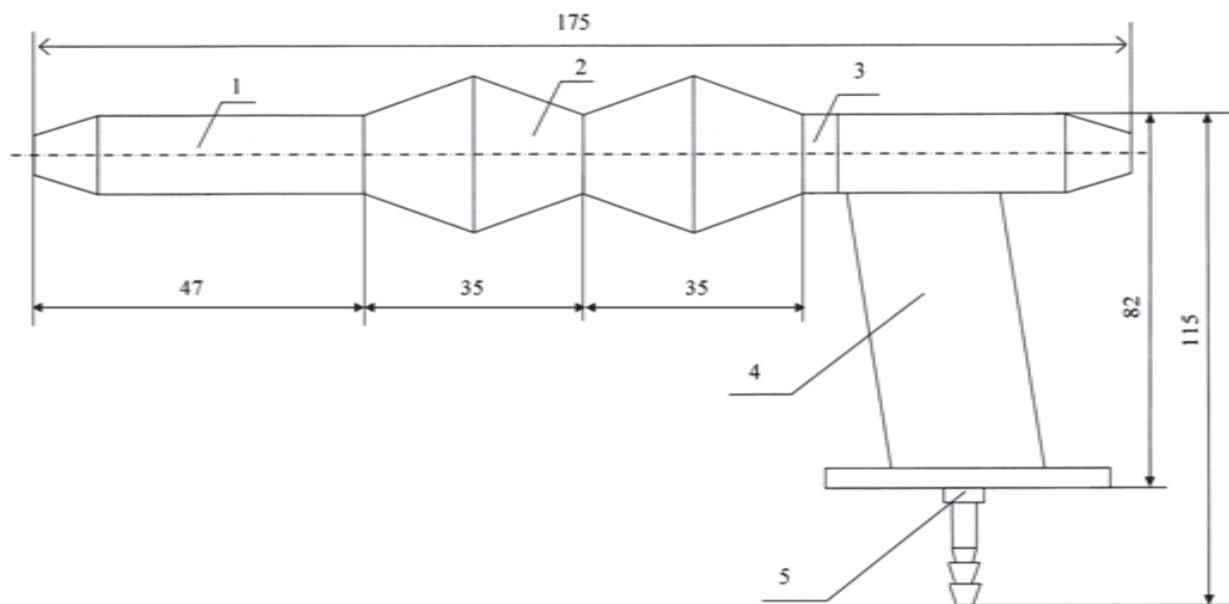


Рис. 5. Общий вид исследуемого макета непроточного ПВД:

1 – входной цилиндрический участок; 2 – профилированный участок; 3 – контрольная гайка; 4 – крепежный кронштейн; 5 – штуцер отбора статического давления

спектра обтекания рассматриваемого приемника с использованием программы Flow Vision версии 2.x [3]. В программе Flow Vision версии 2.x реализован метод конечных объемов, используется прямоугольная сетка с локальной адаптацией и подсеточным разрешением геометрии, что позволяет точно описывать области сложной геометрической формы. Кроме того, для повышения точности расчетов возможна адаптация сетки по форме границы расчетной области и динамическая адаптация к решению. Таким образом, получается расчетная сетка, достаточная для точного описания пограничного слоя вблизи стенок и в областях резкого изменения гидродинамических параметров. Для аппроксимации уравнений применяется конечно-объемный подход, позволяющий точно аппроксимировать законы сохранения на уровне отдельных ячеек. Итоговый метод решения уравнений Навье-Стокса имеет второй порядок аппроксимации, что позволяет получать точные решения даже на грубой расчетной сетке. Сам метод решения уравнений Навье-Стокса широко известен, поэтому здесь он не рассматривается. Настройки модуля решения уравнений установлены по умолчанию. Расчетная сетка одинаковая для указанных моделей турбулентности.

Также проведено математическое моделирование с помощью программы Open FOAM, которая применяется для моделирования течения жидкости и газа. В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. Рабочим языком кода является язык C++ [4]. В терминах данного языка большинство

математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений. В процессе моделирования использовался решатель SimpleFoam – стационарная программа решения для турбулентного течения неньютоновой жидкости. При вычислении не учитывались шероховатость поверхности и крепление приёмников к поверхности летательного аппарата. Исходными данными для математического моделирования являлись скорость потока, угол между направлением потока и осью макета ПВД, а также плотность воздуха в соответствии с проведенными экспериментами. Использовалась тетраэдральная сетка с призматическим слоем вблизи поверхности приемника для учета пограничного слоя. В целом параметр u^+ не превышал 1, что является показателем правильного описания процессов в пограничном слое. Проводилось сравнение результатов моделирования с данными, полученными после эксперимента.

На рис. 6 показано распределение давления по длине профилированного участка приемника (приведены результаты эксперимента и математического моделирования: «щель» – соответствует случаю отбора давления щелью, «отв.» – соответствует случаю отбора давления отверстиями, «FV SST» – математическое моделирование с

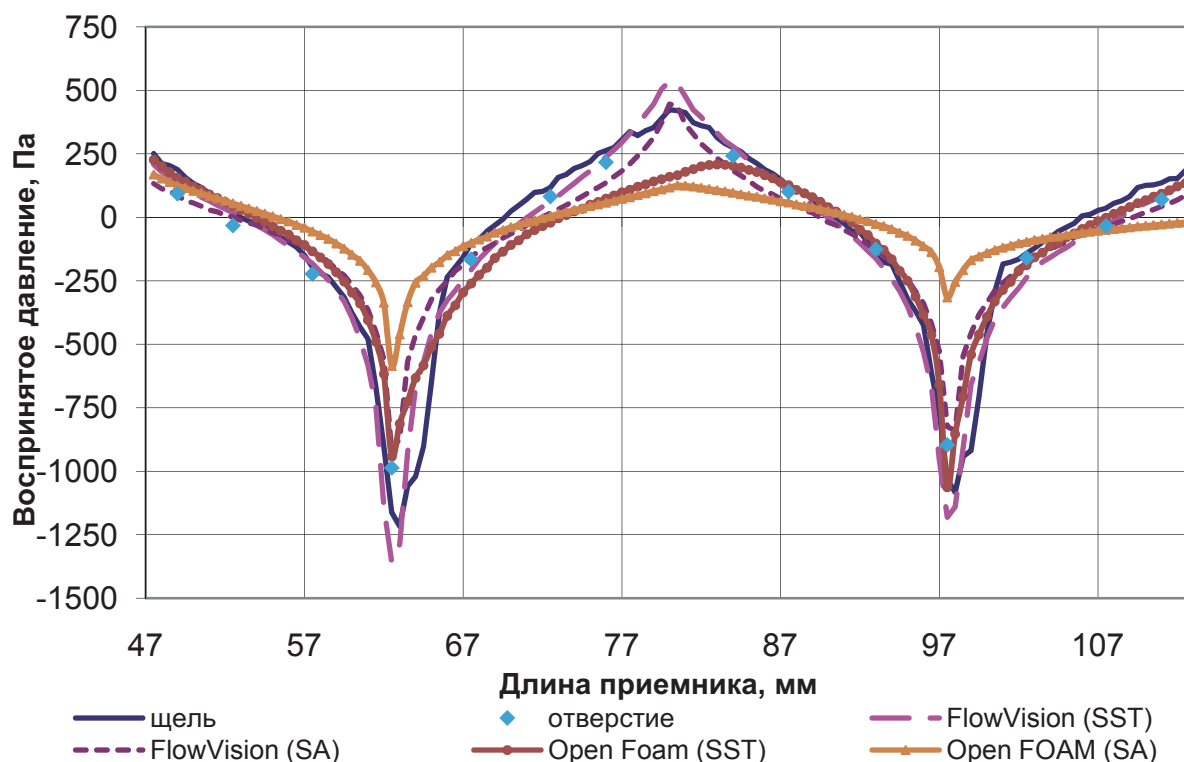


Рис. 6. Распределение давления по длине профилированного участка при скорости набегающего потока 200 км/ч

использованием SST-модели турбулентности программе Flow Vision, «FV SA» – математическое моделирование с использованием SA-модели турбулентности программе Flow Vision, «OF SST» и «OP SA» соответственно в программе Open FOAM). Длина приемника отсчитывается от носовой части, все воспринимаемые давления приведены в Паскалях относительно давления невозмущенного потока.

Как видно из приведенных выше результатов есть расхождение как между двумя проведенными экспериментами, так и между математическими моделями.

При анализе сходимости результатов исследования обращают на себя внимание следующие моменты:

- значительное расхождение наблюдается на задних гофрах, где возможно образование вихрей;
- ввиду того, что диаметр отверстий для отбора давления составляет 1,5 мм, происходит некоторое усреднение давления на этом участке;
- отсутствует достоверная информация о величине турбулентности потока в аэродинамической трубе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе кратко рассмотрены вопросы создания сетки конечных элементов с использованием коммерческих и open-source программ. Отмечено, что коммерческие программы наце-

лены на обычного инженера, который в сжатые сроки должен проводить большой объем исследований, поэтому важно предоставить инструмент с интуитивно-понятным графическим интерфейсом. Open-source программы, изначально ориентированные на энтузиастов и академических исследователей, уже практически не уступают по имеющемуся функционалу и развитие технологических платформ [9] свидетельствует об увеличении интереса к open-source проектам.

Результаты сравнения показали, что часть экспериментальных исследований при проектировании приемников воздушных давлений может быть заменена математическим моделированием с использованием либо коммерческих программ типа FlowVision, либо программ с открытым исходным кодом типа OpenFoam.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина М.М., Сорокин М.Ю. Методика математического моделирования зондовых средств восприятия воздушных давлений // Датчики и системы. 2013. №6. С. 9-13.
2. Официальный сайт программы Ansys. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения 10.10.2016).
3. Официальный сайт программы FlowVision. URL: <http://www.flowvision.ru> (дата обращения 10.10.2016).
4. Официальный сайт программы OpenFOAM. URL: <http://www.openfoam.com> (дата обращения 10.10.2016).
5. Официальный сайт программы NetGen. URL: <http://www.netgen.com>

- www.netgen.org (дата обращения 10.10.2016).
6. Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T.J., Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development, NASA TM-110446, 1997, 100 p.
 7. Сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований приемника полного давления ППД-С1 / В.Н. Моисеев, И.П. Ефимов, М.Ю. Сорокин, А.А. Павловский // Автоматизация процессов управления. 2012. № 2(28). С. 23-27.
 8. Дубинина М.М., Сорокин М.Ю. Выбор модели турбулентности для математического моделирования зондовых средств восприятия давлений // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2013. № 2. С. 28-32.
 9. Официальный сайт технологической платформы UniHub. URL: <http://www.unihub.ru> (дата обращения 01.08.2016).

APPLICATION PROGRAMS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR MATHEMATICAL MODELING

© 2016 М.М. Tsybina

Ulyanovsk State Technical University

This article considers software for preparation a grid of terminal elements for carrying out mathematical simulation of an external flow of different probe means of air pressure perception and results of the experimental researches and mathematical simulation.

Keywords: finite element mesh, commercial program, open-source program, experimental research, mathematical modeling.