

# УСТОЙЧИВЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Ю.Е. Воскобойников**, д-р физ.-мат. наук, профессор

**В.А. Боева**, аспирант

(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Основные задачи математического моделирования энергетических установок связаны с идентификацией и диагностикой состояния, анализом переходных процессов и построением систем автоматического управления для обеспечения эффективной эксплуатации оборудования и предотвращения аварийных ситуаций.

Основная сложность построения математической модели заключается в существенной нелинейности объекта. Поэтому для описания таких объектов в работе используются интегральная модель с квадратичными ядрами Вольтера вида

$$f(t) = \int_0^t k_1(\tau_1)\varphi(t - \tau_1)d\tau_1 + \iint_{0\ 0}^t k_2(\tau_1, \tau_2)\varphi(t - \tau_1)\varphi(t - \tau_2)d\tau_1d\tau_2$$

и задача непараметрической идентификации заключается в построении оценок для функций (ядер Вольтера)  $k_1(\tau_1), k_2(\tau_1, \tau_2)$ . В литературе известны формулы обращения, в которых оценки для  $k_1(\tau_1), k_2(\tau_1, \tau_2)$  получаются взятием первой (для  $k_1(\tau_1)$ ) и второй (для  $k_2(\tau_1, \tau_2)$ ) производных от зарегистрированных значений выходного сигнала системы  $f(t)$  на специально сформированный входной сигнал  $\varphi(\tau)$ . Для устойчивого вычисления производных по дискретным зашумленным значениям  $f(t)$  в работе предлагается использовать сглаживающий кубический сплайн. При этом главное внимание было уделено выбору параметра сглаживания сплайна из условия минимума ошибки вычисления производных при различных распределениях шумов измерений выходного сигнала идентифицируемой системы.

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХКАНАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ОБЪЕКТА

**А.А. Воевода**, доктор техн. наук, профессор (НГТУ, г. Новосибирск), **В.И. Шипагин**, аспирант (НГТУ, г. Новосибирск)

Предлагается алгоритм преобразования регуляторов, синтезированных с использованием полиномиального матричного разложения, к нейросетевой реализации. Объекты и регуляторы предполагаются линейными, что позволяет их описывать матричными передаточными функциями. В процессе синтеза передаточная функция объекта преобразуется к правому полиномиальному матричному взаимнопростому разложению, а передаточная функция регулятора ищется в виде левого полиномиального матричного взаимнопростого разложения, что позволяет привести характеристическую матрицу к виду линейного матричного полиномиального уравнения с двумя матричными неизвестными. Это уравнение решается, например, приведением к матричному уравнению с числовыми матричными неизвестными. Далее уравнение регулятора преобразуется к дискретному виду с достаточно малым шагом дискретизации. Дискретный регулятор преобразуется к структуре, включающей себя звенья запаздывания, сумматоры и коэффициенты усиления, что эквивалентно совокупности нейронов с типовой структурой. На следующем шаге вычисляются параметры нейронов в соответствии вычисленными параметрами регуляторов. На следующем этапе учитываются дополнительные особенности математического описания объекта, например нелинейности, для чего необходимо ввести коррекцию нейронной структуры, а далее осуществляется обучение по одному из алгоритмов, например, с обратным распространением ошибки. Предлагаемый алгоритм синтеза нейроструктуры управляющих регуляторов иллюстрируется на примере синтеза управления неустойчивым перевернутым маятником, включающим в себя два ПИД-регулятора.

## ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ТОМОГРАФИИ

**С.М. Зеркаль**, д-р техн. наук, проф. **Н.А. Лихачев** аспирант  
(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Рассматривается задача поиска дефектов в элементах строительных конструкций, таких как колонны или толстостенные трубы, методами рентгеновской томографии. В этом случае классическая схема измерений, когда траекторией источника является лежащая в одной плоскости замкнутая кривая, охватывающая объект, представляется неэффективной. Как показало численное моделирование, надёжно могут быть реконструированы только изображения трещин, лежащих в плоскости траектории. Использование спирального движения источника, приводит во-первых, к значительному усложнению оборудования и, во-вторых, также не позволяет обнаружить все трещины.

В работе предлагается инновационный метод, объединяющий априорные знания с достижениями интегральной геометрии. Исходя из распределения нагрузок, действующих на конструкцию, определяются наиболее вероятные направления распространения трещин. По этой информации можно определить оптимальные положения источников. Это будут такие, лучи, от которых преимущественно проходят вдоль направлений трещин. Если измерения с этих ракурсов провести невозможно, то по реальным имеющимся проекциям вычисляются так называемые виртуальные проекции, которые были бы зарегистрированы от источника, находящегося в заданной точке. Соответствующие формулы приведены в [1, 2]. Таким образом, для обработки оказываются доступны проекции, по которым можно обнаружить наиболее опасные трещины.

1. Благовещенский А. С. О восстановлении функции по известным интегралам от неё, взятым вдоль линейных многообразий // Математические заметки. 1986. Т. 39, № 6. С. 841-840.
2. Трофимов О. Е. Алгоритм построения виртуальных рентгеновских проекций // Автометрия. 2005. Т. 41, № 3. С. 64-49.

# **СИНТЕЗ КУБИЧЕСКИХ СГЛАЖИВАЮЩИХ СПЛАЙНОВ ПРИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

**Ю.Е. Воскобойников**, д-р физ.-мат. наук, профессор  
**(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)**

Математические модели многих технических систем имеют вид интегрального уравнения Вольтера I рода с разностным ядром. Для таких систем задача идентификации заключается в построении оценки для импульсной переходной функции системы по зарегистрированным значениям входного и выходного сигнала. Такая задача является некорректно поставленной, в которой могут нарушаться одно или несколько условий корректности. Для нахождения единственного и устойчивого решения используют различные (как детерминированные, так и статистические) методы регуляризации.

В недавней работе автора был предложен устойчивый алгоритм, суть которого заключается в переходе от решения вольтеровского уравнения I рода к решению уравнению II рода, что является уже корректной задачей. Вычисление первых производных входного и выходного сигналов, содержащихся в интегральном уравнении II рода, на основе аппарата сглаживающих кубических сплайнов позволило снизить негативное влияние шумов измерений на общую ошибку идентификации.

Однако, применение сглаживающих сплайнов обусловило ряд вопросов, связанных с выбором параметра сглаживания сплайна из условия минимума ошибки вычисления первых производных при различных распределениях шумов измерений. Поэтому данная работа посвящена исследованиям, результаты которых позволили дать ответы на эти вопросы. В частности, для оценивания оптимального параметра сглаживания предлагается использовать модификацию критерия оптимальности линейного алгоритма фильтрации.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ СУХИХ СМЕСЕЙ

**Л.В. Ильина**, д-р техн. наук, профессор, декан; **И.Н. Мухина**, канд. техн. наук, доцент (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск), **А.К. Туляганов**, ст. преподаватель (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск), директор (ООО ЛКЗ «Колорит», г. Новосибирск)

При составлении рецептов сухих смесей учитывают физико-механические показатели цементных растворов, условия твердения и эксплуатации, назначение сухих смесей.

Для оптимизации составов сухих смесей использовался метод многофакторного планирования эксперимента с последующей математической обработкой результатов. В качестве дисперсной минеральной добавки использовался диопсид, его оптимальное количество 7 % от массы цемента было определено ранее. В качестве четырех факторов эксперимента являлись количества (мас. %) редиispersируемого полимерного порошка (0,3-0,5), гидратной извести (15-25), метилцеллюлозы (0,2-0,4) и волокна (0,4-0,6). Исследовалось влияние указанных факторов на прочность раствора при изгибе, прочность сцепления при отрыве от основания, стойкость к образованию трещин. Была составлена матрица полного факторного эксперимента размерности  $2^n \times n$ , с учетом  $n=4 - 16 \times 4$ . Корреляционный анализ матрицы показал отсутствие линейных связей между факторами. Методом наименьших квадратов были получены три уравнения линейной множественной регрессии. Статистический анализ показал, что на уровне значимости 0,05 все коэффициенты уравнений значимы, уравнения значимы. Коэффициенты детерминации  $R^2$  близки к 1. Результаты расчетов по предложенным моделям полностью согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, в результате полного факторного эксперимента и математической обработки результатов были получены уравнения регрессии, с помощью которых можно составить широкую рецептуру сухих смесей в зависимости от требуемых свойств.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ АКТИВНОСТИ ЦЕМЕНТА ДИСПЕРСНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ**

**Л.В. Ильина**, д-р техн. наук, профессор, декан; **И.Н. Мухина**, канд. техн. наук, доцент (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Авторы рассматривают возможность повышения прочности при сжатии цементного камня путем введения дисперсных минеральных добавок (диопсида и известняка), являющихся отходами горнодобывающих производств. Для различных сроков и режимов твердения цементного камня предложены множественные регрессионные модели, описывающие зависимость прочности цемента от состава и количества минеральных добавок – диопсида и известняка. Верификация моделей включала проверку соответствия вычисленных значений прочности цементного камня фактическим измеренным. Была выполнена процедура условной оптимизации (максимизации) найденных уравнений с целью определить такой состав минеральной добавки, который бы обеспечил наибольшую прочность цементной матрицы для соответствующих условий твердения. Кроме того, были исследованы остатки уравнений регрессии. Исследование подтвердило, что дисперсия ошибок измерений постоянна, условия Гаусса-Маркова выполнены и факторы, включенные в модель (количество диопсида и количество известняка), адекватно отражают физические процессы твердения цемента. Для наглядного представления результатов исследований в статье представлены графики зависимости прочности цемента от вводимых добавок в виде графиков поверхностей и графиков изолиний для случаев линейной и нелинейной моделей.

**ЧИСЛЕННЫЙ                      АНАЛИЗ                      СИСТЕМЫ  
МОНИТОРИНГА                ЗАГРЯЗНЕНИЙ                ГОРОДА  
НОВОСИБИРСКА**

**А.В. Гочаков**, канд. техн. наук (СибНИГМИ, г. Новосибирск), **А.В. Пененко**, канд. физ-мат. наук (ИВМиМГ, г. Новосибирск)

В работе рассматривается обратная задача поиска источников выбросов для модели переноса и трансформации примесей в атмосфере по данным мониторинга. Для решения, обратная задача сводится к семейству квазилинейных операторных уравнений с операторами чувствительности. Анализируя свойства операторов чувствительности, можно охарактеризовать систему мониторинга. Приводятся результаты численных экспериментов.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

**О.С. Ванькова**, аспирант, **Н.Н. Федорова**, д-р физ. – мат. наук, профессор, (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

В настоящей работе представлены результаты трехмерного численного моделирования смешения сверхзвукового ( $M_\infty = 3.83$ ) потока воздуха и струй аргона в модельной камере сгорания, представляющей собой плоский канал с внезапным расширением. Расчеты проведены для условий экспериментов [1], выполненных в импульсной аэродинамической установке ИТ-302. Звуковые струи аргона впрыскиваются по нормали к основному потоку через круглые отверстия, расположенные перед расширением на верхней и нижней стенках модели. Давление подачи струй и параметры основного потока падают во время эксперимента.

Расчеты проведены в ANSYS Fluent на основе полных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Основной целью является разработка методологии расчета с нестационарными входными условиями. Для тестирования методики использовались экспериментальные данные о распределении давления на стенках канала и ширин-визуализация потока. Численно исследовано влияние изменения коэффициента динамического напора струй на структуру течения в канале и параметры смешения.



## О ЗАДАЧЕ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ТИПА «КАЧЕЛИ»

**О.А.Вотрина**, аспирант, **К.Н. Мелешкин**, аспирант (НГТУ, г.Новосибирск)

В современной отечественной и зарубежной литературе широко обсуждается проблема стабилизации нелинейных маятниковых объектов, в том числе объектов типа «Качели». Объект «Качели», состоящий из маятника с грузом, подвешенного на тонкой нити, используется в биомедицине при моделировании движений коленного сустава, а также при моделировании походки человека. Нередко такой объект используется для моделирования движения разных частей тела в паре с другими объектами.

Математическая модель объекта «Качели» по одной из интерпретаций имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{K}{J + Mu^2}, \\ \dot{K} = -\frac{cK}{J + Mu^2} - (Mu + mb)\sin\alpha. \end{cases}$$

где  $\alpha$  – угол отклонения маятника от вертикали,  $c$  – коэффициент сил вязкого трения,  $K$  – кинетический момент системы,  $J$  – момент инерции маятника относительно точки подвеса,  $M$  – масса перемещающейся вдоль маятника материальной точки,  $m$  – масса физического маятника,  $b$  – расстояние от точки подвеса до центра масс,  $u$  – расстояние от точки подвеса до материальной точки.

В литературных источниках представлено несколько подходов к стабилизации объекта «Качели», среди них стабилизация при помощи релейного управления, применение ПИ-регулятора, регулятора перехода и другие. Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки.

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАДРАТИЧНОГО ПОЛИНОМА ВОЛЬТЕРРА**

**Е.Д. Антипина**, магистрант

**(ИГУ, ИСЭМ СО РАН, ИРКУТСК)**

В данной работе рассматривается имитационная модель, построенная на основе полиномов Вольтерра, применяемых в теории математического моделирования для описания динамики нелинейных систем типа "вход-выход" [1]. Для построения интегральных моделей использовались данные, полученные с помощью ПК "P150" [2] применительно к участку пароводяного тракта, входящего в энергоблок Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Выполнено тестирование построенных интегральных моделей для входных сигналов ступенчатого типа. Получено решение специальной экстремальной задачи для оптимизации амплитуд тестовых сигналов при идентификации ядер Вольтерра. Результаты согласуются с рекомендациями, приведенными в [3] применительно к имитационным моделям динамики элемента теплообменного аппарата и ветроэнергетической установки.

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.3.1 программы фундаментальных исследований СО РАН, пер. № АААА-А17-117030310442-8.

## **Библиографический список**

1. Apartsin A.S. Nonclassical Volterra Integral Equations of the First Kind: Theory and Numerical Methods. VSP, Utrecht-Boston, 2003.
2. Levin A.A., Chistyakov V.F., Tairov E.A. On application of the structure of the nonlinear equations system, describing hydraulic circuits of power plants, in computations // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2016. Vol. 9. № 4. P. 53–62.
3. Solodusha S.V. Amplitudes of Test Signals for Identification of Volterra Kernels // Proc. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018.

# ОБ ОДНОМ ТОЧНОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ В СКОРЫХ ФИЛЬТРАХ

**Ю.М. Вахромеев**, канд.ф-м.н., доцент  
(НГАСУ (Сибстрин), г.Новосибирск)

Ранее автором [1] была предложена модель очистки воды в обычных водопроводных скорых фильтрах, которая описывается гиперболической системой двух нелинейных уравнений в частных производных первого порядка

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial M}{\partial t} = v \frac{\partial C}{\partial x}, \\ \frac{\partial C}{\partial x} = -\mu M C \end{cases}.$$

где  $\rho$  - плотность осадка,  $v$  - скорость смеси в колонне,  $\rho, v, \mu - \text{const}$ ,  $\mu > 0$ ,  $C(x,t)$  – концентрация взвеси,  $M(x,t)$  – потенциальная “работоспособность” слоя.

Решение задачи Гурса, определяющей  $C(x,t)$  и  $M(x,t)$  было найдено путем обобщенного разделения переменных.

В докладе рассмотрена возможность решения задачи Гурса, используя точное решение, которое получено с помощью группового анализа системы. Что может послужить теоретическим обоснованием решения и, в частности, обоснованием использованного при решении эвристического приема.

## ПОИСК ВЫИГРЫШНЫХ СТРАТЕГИЙ В ИГРАХ С НЕНУЛЕВОЙ СУММОЙ

**Л.А. Литвинов**, ст. преп.  
**(НГАСУ (Сибстрин) г. Новосибирск)**

Теория игр - это раздел прикладной математики, в котором рассматриваются оптимальные стратегии игры с учетом представлений обо всех ее участниках, ведущих борьбу за свои интересы и преследующих собственные цели, располагая своими ресурсами. Особенно часто этот математический инструмент находит применение в экономике и политике.

Оптимальные решения или стратегии в математическом моделировании предлагались ещё в XVIII в. Задачи производства и ценообразования в условиях олигополии, которые стали позже хрестоматийными примерами теории игр, рассматривались в XIX в. А. Курно и Ж.Бертраном. В начале XX в. Э.Ласкер, Э.Цермело, Э.Борель выдвигают идею математической теории конфликта интересов. Большим вкладом в применение теории игр стала работа Томаса Шеллинга, нобелевского лауреата по экономике 2005 г. «Стратегия конфликта».

Игрой называют математическую модель конфликта. Она может быть с нулевой суммой, если выигрыш одного игрока равняется проигрышу другого. При невыполнении этого условия игра будет с ненулевой суммой.

В матричных играх с нулевой суммой оптимальное решение для каждого игрока точно определяется в чистых или смешанных стратегиях. Условием получения максимального выигрыша является соблюдение игроком своей оптимальной стратегии. В случае игр с ненулевой суммой игроки должны преследовать не только свои антагонистические интересы, но и учитывать преимущества, которые дает взаимная кооперация.

Примерами таких игр могут быть военные конфликты, коммерческие сделки, различные аспекты взаимоотношений между людьми, и т.д.

Представляет интерес исследование математических моделей торга, обещаний, угроз и сдерживания.

# **КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРЕЖЕННЫХ НАНОГАЗОВЗВЕСЕЙ С КОМПОЗИТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

**С.Л. Краснолуцкий**, к.ф.-м.н., доцент

**(НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск)**

В настоящее время во многих биомедицинских приложениях, при производстве различной косметической продукции, средств экологической защиты и т.п. часто используются различные композитные наночастицы.

С помощью ранее разработанной кинетической теории, потенциала [1] и пакета программ KinSib проведено моделирование вязкости разреженных наногазовзвесей с композитными частицами из углерода (графит) с урановой оболочкой толщиной 1 нм и сплошными наночастицами из урана и углерода диаметром от 2 до 100 нм в азоте при температуре 300 К и атмосферном давлении. Показано, что добавление наночастиц способно как повышать, так и понижать вязкость наногазовзвеси по сравнению с чистым азотом. Вязкость наногазовзвесей с композитными частицами из углерода с урановой оболочкой всегда меньше вязкости наногазовзвесей со сплошными частицами из урана и больше вязкости наногазовзвесей со сплошными частицами из углерода того же размера.

Такое поведение вязкости наногазовзвеси можно объяснить на основе кинетической теории меньшей массой композитных наночастиц по сравнению со сплошными из урана и большей по сравнению со сплошными из углерода.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 20-01-00041 и 19-01-00399).

## **Список литературы**

1. *Рудяк В.Я.* Потенциалы взаимодействия композитных наночастиц между собой и с молекулами несущей среды / Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. // Доклады АН ВШ РФ. – 2018. – № 3 (40). – С. 26–37.

## ЛАНЖЕВЕНОВСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИФФУЗИИ НАНОЧАСТИЦ

**В.Я. Рудяк**, д-р. физ.-мат. наук, профессор  
(НГАСУ (СИБСТРИН), НОВОСИБИРСК)

Интерес к изучению наночастиц непрерывно растет. В первую очередь это связано с различными приложениями. Наночастицы используются при создании новых материалов различного назначения. Отдельно следует упомянуть наножидкости, представляющие двухфазную среду, состоящую из несущего флюида и наночастиц, поле применения которых чрезвычайно широкое. Однако наряду с прикладным аспектом изучение наночастиц имеет и важную фундаментальную составляющую. Экспериментальные данные последних двадцати лет показывают, что процессы переноса наночастиц и в газах, и в жидкостях не описываются классическими теориями. Вместе с тем, несмотря на многочисленные попытки, все еще отсутствуют теории, которые хотя бы качественно описывали эти процессы.

В настоящей работе в рамках ланжевеновской концепции обсуждается диффузия наночастиц в газах и жидкостях. Рассматривается как собственно уравнение Ланжевена, так и его нелинейный аналог, применимый для описания диффузии достаточно малых наночастиц. Последнее уравнение является стохастическим аналогом известного уравнения Бернулли. Это позволяет построить и его решение. Анализируется двухвременная автокорреляционная функция скорости (АКФС) наночастицы. Показано, при каком виде корреляционной функции действующей на наночастицу случайной силы АКФС является суперпозицией двух экспонент, ранее зафиксированной методом молекулярной динамики. Получены оценки для этих двух времен релаксации. В случае газов найдена их зависимость от числа Кнудсена. Выведено уравнение для АКФС наночастицы. Обсуждаются отличия диффузии наночастиц и обычных броуновских.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке

РФФИ (гранты № 19-01-00399 и № 20-01-00041).



# **ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**В.Н. Копылов**, д-р техн. наук, доцент

**(НГАСУ, г. НОВОСИБИРСК)**

В докладе на примере недавно построенных в г.Новосибирске крупномасштабных объектов с помощью разработанной геоинформационной технологии представлены результаты оценки воздействия строительства на окружающую среду. В качестве исходных данных в технологии используются спутниковые изображения высокого пространственного разрешения, полученные в видимом и инфракрасном диапазонах. В рассматриваемых примерах применялись ретроспективные и современные спутниковые изображения районов города, полученные с помощью приложения Google Earth в сети Интернет. После геометрических и яркостных преобразований изображения совмещались с крупномасштабной картой рассматриваемых районов для дальнейшего сравнительного анализа изменений, произошедших за определенный промежуток времени. Для выделения на изображениях нужных объектов реализованы как интерактивный, так и автоматический подходы. Опытная эксплуатация технологии показала хорошую точность оценки площади нарушенных природных объектов, во многом зависящую от детальности и точности географической привязки спутниковых изображений.

Разработанную технологию можно применять при текущем мониторинге районов строительства, анализе экологической обстановки, выборе мест строительства различных объектов, мониторинге опасных процессов и чрезвычайных ситуаций в местах строительства, для решения других задач на основе интеграции картографических, спутниковых, авиационных, геофизических и статистических данных.

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОДАТЧИКА

**М.Н. Данилов**, м.н.с., ст. преп. (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск), **П.П. Бардаев**, ведущий инженер (ФГУП «СибНИА им С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск)

Конструирование упругого элемента многокомпонентного тензодатчика может быть сведено к решению задачи многоцелевой топологической оптимизации, которая формулируется следующим образом: найти геометрию упругого элемента, обеспечивающую экстремальные значения некоторого функционала (целевой функции)

$$\Phi(x) = c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \dots + c_N f_N(x),$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in X \subset E_N,$$

при наличии фазовых ограничений геометрического характера

$$X = \{x : x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}\},$$

и целевых ограничений

$$\varphi_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m.$$

Корректная формулировка данной задачи и эффективные методы ее решения являются основой систем автоматизированного проектирования упругих элементов многокомпонентных тензодатчиков силы.

В качестве основы целевой функции предлагается использовать число обусловленности матрицы калибровочных коэффициентов (которое является мерой эффективности конструкции упругого элемента):

$$\text{cond}(A) = \|A\| \|A^{-1}\|$$

где  $\|A\|$  – норма матрицы  $A$  (норма L1, L2,  $\infty$ -норма, евклидова норма);  $A$  – матрица калибровочных коэффициентов.

На основе модуля оптимизации ANSYS Design Explorer, конечноэлементного решателя ANSYS Mechanical APDL и мак-

роязыка APDL разработана вычислительная технология решения сформулированной задачи оптимизации.

# **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТРЕЩИНАМИ**

**М.Н. Данилов**, м.н.с., ст. преп. (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Оптические методы измерения полей относительных деформаций поверхности конструкций в настоящее время находят широкое применение при изучении процессов деформирования конструкций из структурно-неоднородных материалов. Наиболее широкое применение получили системы с двумя цифровыми фотокамерами (например, коммерческая система Correlated Solutions VIC-3D), позволяющие производить измерение перемещений точек поверхности в 3D пространстве. В основе данных систем лежат алгоритмы корреляционного анализа изображений, которые в настоящее время продолжают совершенствоваться.

Структурно-неоднородные материалы типа бетона являются разупрочняющимися квазихрупкими материалами, которые разрушаются преимущественно в результате образования трещин. Изучение процессов деформирования конструкций из таких материалов с использованием оптических датчиков деформаций затруднено из-за неустойчивости алгоритмов корреляционного анализа изображений областей поверхности с трещинами, что приводит к потере большого количества важной информации о напряженно-деформированном состоянии материала в окрестности трещины. Предложен устойчивый алгоритм корреляционного анализа изображений областей поверхности с трещинами, который обеспечивает получение полной информации о напряженно-деформированном состоянии материала в окрестности трещины. Алгоритм протестирован на доступных экспериментальных данных.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЗВЕСЯХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В КАНАЛЕ С РАСШИРЕНИЕМ**

**Лаврук С.А.,  
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)**

Методами численного моделирования были исследованы режимы распространения детонации каналах с линейным расширением, заполненных монодисперсными смесями кислорода и микронных или наноразмерных частиц алюминия. Детонационное горение микронных и наночастиц описывается в рамках полуэмпирической модели с учетом перехода от диффузионного режима к кинетическому. Было получено, что ячеистые структуры в наноразмерных газовзвесах характеризуются неровностями, вызванными более высоким значением энергии активации, чем в газовзвесах микроразмерных частиц. Выявлены основные режимы распространения детонации: докритический (срыв распространения детонации), критический (срыв детонации в части канала с возможным его восстановлением), закритический (распространение детонации без срыва). Установлено влияние геометрических параметров: ширины канала, угла расширения, размера частиц на режимы распространения. В отличие от микронных частиц для наночастиц (200 нм) ввязь между углом наклона стенки и критической шириной канала линейна до угла расширения в  $40^\circ$ , а при  $\alpha > 40^\circ$  критическая ширина канала не зависит от угла наклона стенки. Установлена аналогия критических условий детонации нанодисперсных взвесей и газовой детонации из известных в литературе.

# **ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННУЮ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ**

**Соппа М.С.**, д-р физ.-мат. наук, профессор  
**(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)**

В процессе проектирования антенных систем, имеющих заданные радиолокационные характеристики в СВЧ диапазоне, возникают сложные задачи математического моделирования. Назовем кроссполяризационно эквивалентными электромагнитные рассеиватели, для которых диаграмма рассеяния (ДР) первого из них при Е - поляризованной падающей волне совпадает с ДР второго при Н - поляризованной падающей волне.

Для построения кроссполяризационно эквивалентных рассеивателей предлагается использовать физико - математическую модель дифракции плоских электромагнитных волн на цилиндрических телах с импедансной поверхностью. В стационарном случае это приводит к двумерному уравнению Гельмгольца с модифицированным граничным условием [1].

Интегральное представление для рассеянного поля, записанное с использованием фундаментального решения, позволяет перейти к системе интегральных уравнений, как для основной линейной Е - поляризации, так и для Н - поляризации, поперечной к ней. Последующая дискретизация на основе метода граничных элементов позволяет перейти к комплекснозначной хорошо обусловленной СЛАУ.

Налагая специальные ограничения на вид функциональных связей между синтезируемыми покрытиями, удастся построить наборы кроссполяризационно эквивалентных рассеивателей в широком диапазоне требуемых свойств.

Литература

1. Соппа М.С. Метод граничных элементов в электро- и аэродинамических задачах. Монография. Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин), 2013. - 348 стр.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

**С.В. Погудалина**, аспирант (ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск), **Н. Н. Федорова**, д-р физ.-мат. наук, профессор (НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

При проектировании протяженных или высотных строительных сооружений необходимо учитывать их динамическое взаимодействие с внешним воздушным потоком. Для предотвращения нежелательных колебаний, приводящих к повреждениям или разрушениям зданий и сооружений, следует проводить исследования ветровых воздействий на строительные конструкции.

Ранее авторами проведены сопряженные расчеты по технологии двунаправленного сопряжения для стержня/призмы при различных геометрических параметрах (высота и поперечное сечение модели), свойствах материала стержня и скорости потока [1]. В данной работе получены результаты трехмерного моделирования для стержня высотой 0.4 м и квадратного сечения  $0.03 \times 0.03$  м.

В работе представлены результаты численного моделирования колебаний упругого стержня, установленного перпендикулярно внешнему потоку на подложке. Моделирование выполнено в ANSYS с использованием технологии двунаправленного сопряжения. Получены собственные частоты и формы колебаний модели. Проанализирована структура и описаны особенности течения воздуха в окрестности стержня. Исследован процесс возбуждения колебаний упругой модели под действием внешнего потока и определено его напряженно-деформированное состояние.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-38-90163.

1. Pogudalina S.V., Fedorova N. N. Mathematical modeling of vortex induced vibrations of an elastic rod under air flow Influence, AIP Conference Proceedings 1939, 020023 (2018).

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕДЕЛОВ ОБЛАКОВ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

**И.А. Бедарев**, канд. физ.-мат. наук, доцент, (ИТПМ СО  
РАН, НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

В работе выполнено математическое моделирование взаимодействия ячеистой детонационной волны, распространяющейся по водородовоздушной смеси, со слоем нереагирующего газа. Предлагается для подавления детонации и изоляции зон горения использовать пробки инертных газов. Газодинамика процесса моделировалась системой уравнений Навье–Стокса, описывающей движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа, с учетом многокомпонентности газовой смеси и химической кинетики. Для описания процесса горения смеси горючего и окислителя задействован приведенный кинетический механизм. Вычислительная технология реализована в рамках пакета ANSYS Fluent.

Проведено сравнение взаимодействия детонационной волны с пробками трех инертных газов: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar. В зависимости вида изолирующего газа и длины пробки могут реализовываться различные режимы течения после выхода ударной волны из инертной пробки: а) с реиницированием детонации; б) подавление детонационной волны с образованием волны дефлаграции; в) подавление детонационной волны без образования волны дефлаграции. Определены геометрические пределы облаков CO<sub>2</sub>, Ar и N<sub>2</sub> приводящие к срыву ячеистой детонации и изоляции зоны горения. Сравнение для различных газов показало, что наименьшая длина облака, приводящая к гашению детонации и горения, достигается для углекислого газа и составляет для рассмотренного случая 0.4 м.



# **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ДЕТОНАЦИИ ИНИЦИИРУЕМОЙ БЫСТРОЛЕТЯЩИМ ТЕЛОМ**

**В.М. Темербеков, аспирант, (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)**

В настоящей работе представлено сопоставление математической модели с теоретической для задачи об инициировании и стабилизации наклонной детонации снарядом малого диаметра, летящим со сверхзвуковой скоростью в водород-кислородной смеси, разбавленной аргоном.

Математическая модель включает в себя осреднённые по Фавру уравнения Навье-Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций. Для моделирования химической кинетики в работе была использована приведённая кинетическая схема, включающая одну брутто-реакцию горения водорода в воздухе. Данная кинетическая схема ранее была верифицирована по экспериментальным данным. В качестве решателя использован программный комплекс ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени используется неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству – схема расщепления вектора потоков AUSM с противопотоковой аппроксимацией второго порядка точности.

В работе проведена оценка энергии инициирования детонации для экспериментальных и расчетных данных. Также было проведено численное исследование влияния размеров метаэлемента тела на режимы детонации, при фиксированном начальном давлении. Расчеты проводились для давления  $P_0 = 141$  кПа и  $P_0 = 121$  кПа. Для давления  $P_0 = 121$  кПа диаметр снаряда увеличивался, а для давления  $P_0 = 141$  кПа диаметр уменьшался, соответственно увеличивалась и уменьшалась работа сил аэродинамического сопротивления при неизменной критической энергии инициирования газовой детонации. Результаты расчетов показали применимость теоретической модели для прогнозирования возбуждения детонации.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА**

**П.С. Любутин**, к.т.н., научный сотрудник

**С.В. Панин**, д.т.н., профессор, зав. лаб. МПКМ

**(ИФПМ СОРАН, Томск)**

Системы технического зрения (СТЗ) широко используются в различных областях науки и прикладных задач. В частности СТЗ и алгоритмы обработки изображений применяются для оценки деформационного состояния материалов и деталей инженерных конструкций. Результатом работы оптических систем оценки деформационного состояния на основе СТЗ является оценка деформации, отображаемая в виде поля деформации, либо набора значений информативных признаков, характеризующих механическое состояние материала. Перед проведением измерений выполняется калибровка системы, которая является отдельным этапом её работы. Результат работы системы определяется использованными методами обработки информации на следующих этапах: формирования изображения; его предварительной обработки; постобработки результатов расчета. К информативным признакам оценки деформированного состояния относится ряд интегральных метрик оценки изображений, таких как фрактальная размерность, коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение, информационная энтропия и др. Получение полей локализации деформаций основано на алгоритмах корреляционного анализа для построения полей векторов перемещений по серии изображений. Деформация в зависимости от задачи, может определяться для плоского и пространственного поля перемещений. Вычисление полей деформации производится путем определения производных от перемещений обычно с использованием численного дифференцирования.

Применение СТЗ позволяет решать задачи определения свойств материала с использованием модели его деформационного поведения, исследования процессов разрушения материалов, оценки остаточного ресурса изделий.

## СИНТЕЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**А.А. Воевода**, д.т.н., профессор, профессор каф. Автоматика НГТУ

**Д.О. Романиков**, к.т.н., доцент каф. Автоматика НГТУ

**(НГТУ, НОВОСИБИРСК)**

Рассматривается решение задачи синтеза управления с применением нейронных сетей на примере приведения системы из произвольного начального состояния в нулевое за минимальное время. Особенностью статьи является 1) применение обучения с подтверждением для решения выше поставленной задачи; 2) синтез структуры нейронной сети и обоснования выбора типов и количества нейронов применяемой нейронной сети; 3) стабилизация нелинейных объектов из неустойчивого начального состояния.

В частности, рассматриваются классические примеры стабилизации объектов с передаточными функциями

$$W_{об1} = \frac{1}{s^2}, W_{об2} = \frac{1}{s^2+1}, \quad (1)$$

с ограничением управления на входе. Моделирование выполняется в дискретном виде с временем дискретизации 0.05с.

Использование нейронных сетей с методами обучения с подкреплением позволяет стабилизировать объекты с передаточными функциями (1) из неустойчивого состояния с ненулевыми начальными условиями на интеграторах (на звеньях задержек в дискретном представлении) и получить управление близкое к оптимальному. Также предложен вариант замкнутой системы с использованием нейронных сетей, которые позволяют стабилизировать передаточную функцию (1) используя сигналы ошибок, а не вектор состояния объекта.

Структура используемой нейронной сети была синтезирована на основании ранее предлагаемых процедур построения нейронной сети для аппроксимации нелинейных функций. Предложено обоснование выбора количества слоев, типов нелинейностей и числа нейронов.

# АЛГОРИТМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**В.А. Боева**, аспирант

(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Нестабильность параметров климатических систем возникает вследствие изменяющихся внешних и внутренних тепловых возмущений. Реакция на возникающие возмущения – переходный процесс системы – будет определять качество параметров микроклимата и устойчивость системы в целом. Таким образом, очевидна необходимость экспериментального изучения переходных характеристик теплообмена климатических систем.

Одной из таких характеристик будет являться импульсная переходная функция (ИПФ) системы. Оценить точность искомой ИПФ возможно, применяя алгоритм идентификации на основе дифференцирования выходного сигнала системы  $f(t)$  при подаче на её вход функции Хэвисайда в момент времени  $t_0$ :

$$k(t) = \frac{d}{dt} f_{t_0}(t), \quad t \in [t_0, T]. \quad (1)$$

Как видно, данный метод предполагает вычисление первой производной  $f'(t)$ , что является некорректно поставленной задачей. Устойчивое дифференцирование сигналов идентифицируемой системы предлагается проводить с помощью аппарата сглаживающих кубических сплайнов. При соответствующем выборе параметра сглаживания такой подход позволяет вычислять первые производные зашумлённых сигналов с высокой точностью.

Математическое моделирование реального теплофизического объекта показало соответствие вычисленных характеристик экспериментальным. Устойчивое дифференцирование переходных процессов теплообмена в системе в дальнейшем даст возможность решить прямую задачу – спрогнозировать реакцию теплового потока на возмущение.