ISSN 2658-5014 (Print)
2021. Т. 3, № 2 (6). С. 59–66

СИИТ
СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2686-7044(Online)
http://siit.ugatu.su

УДК 519.6.

Математическое моделирование процессов гидродинамики и электрохимической обработки с помощью численно-аналитических методов (по материалам научной школы УГАТУ)

Н. М. Шерыхалина[1], Г. И. Федорова[2], С. С. Поречный[3]

[1]n_sher@mail.ru, [2]g_fed@mail.ru, [3]porechny@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 12 мая 2021 г.

Аннотация. Ключевой проблемой современной науки является повышение эффективности методов математического моделирования, а также разработка средств оптимального сочетания аналитических решений и результатов вычислительного эксперимента. Одной из важных задач в этом направлении является разработка средств контроля и доказательства достоверности получаемых значений параметров, учет всех известных источников неадекватности, начиная с этапа формализации и постановки задачи, и, заканчивая анализом полученных результатов. Практика показывает, что даже при наличии строгих доказательств существования и единственности решения, сходимости приближенного результата к точному, существует много источников появления неконтролируемой погрешности. Это ошибки при постановке или дискретизации задачи, ошибки программирования, вычислительные ошибки и т.п. Использование же статистических методов оценки систематической и случайной погрешности по множеству случайных значений весьма затруднительно по двум причинам: число разных методов получения результата слишком мало для получения достаточно точных статистических оценок и, кроме того, отсутствует эталон, с которым сравниваются численные результаты. Приведены результаты исследований в области формализации обоснования достоверности численных решений задач гидродинамики и электрохимической обработки, выполненных в рамках научной школы УГАТУ под руководством заслуженного деятеля науки РБ, д-ра физ.-мат. наук, профессора В. П. Житникова.

Ключевые слова: численно-аналитические методы; оценка погрешности; численная фильтрация; электрохимическая обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Практически во всех областях современных научных исследований одним из основных инструментов изучения поведения сложных объектов является математическое моделирование, которое дает возможность заменить натурный эксперимент математическим, аналитическим или численным. Математическое моделирование позволяет исследовать самые разные процессы и явления. Но так как в большинстве случаев невозможно отразить все свойства реального объекта, любая математическая модель является приближенной. Поэтому возникает необхо-

димость разработки новых методов математического моделирования, развития качественных приближенных численно-аналитических методов построения и исследования математических моделей, тестирования моделей и обоснования их эффективности.

Комплексное исследование научных проблем с применением современных технологий, вычислительного эксперимента и разработкой комплексов программ для проведения этого эксперимента представляет собой очень сложный процесс, достоверность результатов которого необходимо обосновывать. Решение многопараметрической задачи сопровождается появлением на всех этапах различных видов погрешности. Кроме погрешности самой математической модели, на точность результата влияют погрешности исходных данных, погрешности округления, погрешности численного метода. Источниками этих видов погрешностей является ограниченность времени, памяти, разрядности и надежности программ.

Качество анализа численных погрешностей существенно зависит от опыта и интуиции исследователя, применяющего различные приемы, которые обычно остаются за рамками научных публикаций. В настоящее время в вычислительной практике преобладают упрощенные методы обоснования достоверности и оценки погрешности, которые не обладают необходимой надежностью. Сравнение численных данных с результатами физических экспериментов, которое часто используется для оценки погрешности, дает возможность оценить только погрешность аппроксимации, которая содержит в себе погрешность модели, погрешность эксперимента и погрешность вычислений. При отсутствии оценки вычислительной погрешности эта сумма не дает возможности оценить погрешность математической модели. В связи с этим разработка методов оценки погрешности и обоснования достоверности этих оценок является весьма актуальной проблемой.

Математическим моделированием процессов гидродинамики и электрохимического формообразования с помощью численно-аналитических методов и обоснованием точности и достоверности результатов методами многокомпонентного анализа в течение тридцати последних лет в УГАТУ вместе со своими учениками занимался профессор Владимир Павлович Житников.

Под его руководством были защищены 16 кандидатских и 2 докторские диссертации по специальностям: 05.13.16 – «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях», 05.13.18 –«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования». В рамках научного направления было опубликовано 6 монографий, более 500 статей и тезисов докладов.

Результаты научной работы регулярно докладывались на конференциях различного уровня в России (Москва, Санкт Петербург, Казань, Пермь, Чебоксары, Набережные Челны, Кемерово, Новосибирск, Уфа и др.) и за рубежом (Германия, Австрия, Англия, Италия, Испания, Польша, Греция, Япония).

ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Приложение численно-аналитических методов к построению математических моделей течений идеальной весомой жидкости является оправданным и результативным. Данные задачи имеют ряд важных практических приложений в тех областях исследований, где вязкостью жидкости можно пренебречь, например, кавитационные течения, течения воды в гидротехнических сооружениях, а также течения различных жидкостей в технических устройствах типа центробежных форсунок. В работе [1] рассматриваются известные постановки задач, однако специфика этого раздела гидромеханики такова, что интеграл Бернулли, используемый в качестве нелинейного краевого условия, допускает решения существенно различного вида: волновые и безволновые (типа солитона), с гладкой свободной границей и с наличием ее излома (в случае волны Стокса на свободной поверхности образуется излом

с внутренним углом 120°). Каждый из рассматриваемых типов течений требует разработки своей модели решения, в качестве которой выступает некоторая функция, обладающая рядом особенностей, отражающая основные свойства точного решения. Предложенные два варианта математической модели течений основаны на прямом конформном отображении и использовании функции Леви–Чивиты или Жуковского с выделением особенностей высшего порядка. А это позволяет сократить объем вычислений и получить результаты с более высокой точностью, проверить их достоверность, отделить решения, порожденные способом дискретизации задачи и не имеющие тенденции сходимости к точному. Впервые получены численные решения с оценкой погрешности задач о затопленном и погруженном источнике с различным углом наклона стенок и расстоянием от источника до дна, предельные решения с критическим значением числа Фруда, докритические решения солитонного типа, несколько видов решений с особенностями на свободной поверхности. С помощью полученных численных результатов легко определяются опасные сочетания параметров, при которых возможно появление и отрыв солитонов в гидротехнических сооружениях и технических устройствах.

Статистические методы оценки погрешности и достоверности результатов, полученных разными численными методами, алгоритмами и их программными реализациями при различной точности решений приведены в работе [2]. Здесь для решения задач о течении идеальной жидкости с особенностями на свободных границах и внутри потока, задач об обтекании вихря и диполя, а также препятствий в виде полукругового и полуэллипсоидального цилиндра произведена модификация численно-аналитических методов, позволяющая получить предельные конфигурации различных типов решений (с двумя гребнями типа волны Стокса, с критической точкой на свободной поверхности с внутренними углами 180° и 360°, особые докритические солитонного вида, сверхкритические решения с непериодическими волнами и др.)

Работа [3] посвящена автомодельной электрохимической обработке (ЭХО). Впервые была сформулирована задача автомодельной электрохимической обработки и найдено краевое условие автомодельности. Учитывая новизну рассматриваемой задачи, в качестве начальных допущений предполагалось постоянство коэффициента выхода по току и падения напряжения в двойном слое вблизи поверхности электродов, то есть их эквипотенциальность. На основе установленного соответствия между гидродинамической и электрохимической задачами разработан метод решения задач автомодельной ЭХО, получены их аналитические решения. Модифицированным методом Леви–Чивиты получены решения более сложных задач. Также приведены аналитические решения задач автомодельной ЭХО и их классификация. Численно-аналитические решения задач автомодельной электрохимической обработки для точечного и двугранного электрода-инструмента и оценка радиуса кривизны обрабатываемой поверхности во времени расширяют возможность моделирования нестационарного процесса ЭХО и использовались для оценки скорости растворения заусенцев и изменения радиуса кривизны острых кромок обрабатываемых деталей.

В работе [4] задача нестационарной электрохимической обработки на каждом временном шаге впервые была сформулирована, как краевая задача для аналитической функции комплексного переменного, которую составляют частные производные координат обрабатываемой поверхности по времени. В рамках этой работы был разработан численно-аналитический метод, который, в отличие от имевшихся ранее, использует аналитическое решение задачи Римана–Гильберта, что позволяет сократить объем вычислений и получить результаты с более высокой точностью, оценить их погрешность экстраполяционными методами. Проведено численное исследование задач о нестационарной обработке электродами-инструментами различной формы, описывающие переход к стационарному или автомодельному режимам обработки (позволяющие оценить время и величину припуска

для получения заданной точности копирования). Также решены задачи об автомодельной обработке клиновидным электродом-инструментом с изолированными и проводящими поверхностями, которые позволяют рассчитать нестационарные процессы, протекающие вблизи острых кромок и границ изолированных участков.

В гидромеханике, физике и инженерных науках часто решаются задачи Хеле–Шоу. Их решения могут интерпретироваться как потоки в пористых средах (полагая, что они описываются законом Дарси), движение границы фазового перехода (с приложением в металлургии), процессы напыления металлов и анодного растворения в электрохимической обработке. Для этого часто применяются методы конечных разностей и конечных элементов. Однако их недостатком является проблема удовлетворения условий, заданных на бесконечности. Этого недостатка (например, в задачах потенциального обтекания тел безграничным потоком) лишены интегральные методы, такие как метод граничных интегральных уравнений. Значительные результаты получены с помощью численно-аналитических методов, сводящихся к определению интенсивности источников и диполей, распределенных на границе, или вихревого слоя. В последнее время широко используются методы граничных элементов, основанные на применении интеграла Грина.

Осесимметричные задачи Хеле–Шоу изучены намного меньше, чем плоские. Как правило, используемые для их решения методы имеют первый порядок точности. Используя их, трудно рассчитать длительные переходные процессы, приводящие к стационарному или автомодельному режимам. Особенностью таких задач является их «жесткость», т.е. наличие двух или более характерных значений временных параметров, различающихся на порядки. Для повышения порядка точности разрабатываются численно-аналитические методы. При решении плоских задач для разработки таких методов широко применяются методы теории функций комплексного переменного. Основой для применения методов ТФКП к решению осесимметричных задач служат интегральные преобразования Г. Н. Положего аналитической функции комплексного переменного в потенциал и функцию тока некоторого осесимметричного течения. В работе [5] предлагаются модифицированные варианты численно-аналитических методов решения осесимметричных задач Хеле–Шоу высокого порядка точности. Впервые нестационарная осесимметричная задача Хеле–Шоу сведена к решению трех краевых задач для аналитических функций комплексного переменного на каждом временном шаге, а разработанные численно-аналитические методы, в отличие от существующих ранее, имеют третий порядок точности. Это позволило провести исследование длительных переходных процессов и оценить погрешность решения с помощью методов экстраполяции. На основе осесимметричных решений сделаны выводы об условиях и скорости формирования на границе стационарного, автомодельного и финального режимов, позволяющие качественно и количественно описать процесс формообразования в различных характерных зонах границы.

В рамках работы [6] впервые решены плоские задачи обтекания полубесконечной пластины потоком весомой жидкости с образованием вихря и каверны вблизи излома, моделирующие гидродинамические характеристики течения жидкости в центробежной форсунке, и проведены исследования устойчивости этих решений. Детально рассматривается вопрос устойчивости свободного вихря, расположенного за точкой отрыва свободной поверхности от кромки пластины. Для устойчивости равновесного положения вихря необходимо, чтобы при отклонении от положения равновесия возникающая сила возвращала вихрь к положению равновесия. Следует, однако, заметить, что оценивать устойчивость данной задачи по расположению линий тока наложенного течения некорректно, поскольку при сдвиге вихря меняется и наложенное течение. В результате исследования решений задач получены выводы о применимости принципа максимального расхода для нахождения па-

раметров течения, а также выводы о неустойчивости равновесного вихря в рассмотренных задачах.

Проблема повышения точности оценки вероятностных характеристик случайных процессов в средствах измерений рассмотрена в [7]. Разработанная модель процесса обработки случайного сигнала позволяет учесть ограниченность диапазона измерений, дискретность отсчетов и накопление погрешности округления. Сформулированный на основе дискретной модели комплексный подход к оценке погрешностей обработки результатов измерений и методика, реализующая этот подход, отличаются сочетанием статистических и детерминированных способов уменьшения погрешностей, что дает возможность оценить все составляющие погрешности, уточнить результат применения разработанных методов и убедиться в достоверности полученных оценок, проверить адекватность моделей, применяемых для описания реальных процессов. Результаты апробации позволили определить закономерности изменения погрешностей численных методов и округления при обработке случайных сигналов и выбрать наилучшие значения параметров процесса обработки. Это существенно увеличило точность и достоверность результатов обработки конкретного случайного сигнала.

Разработанная в рамках работы [8] математическая модель течения электролита в межэлектродном пространстве и предложенные на ее основе схемы вычислений позволяют описать режимы с возвратным течением, учесть газовыделение и переменность межэлектродного зазора, возникающих при импульсной электрохимической обработке при колеблющемся электроде-инструменте. Здесь впервые решены задачи стационарной обработки электродом-инструментом со щелью с изоляцией и без изоляции на тыльной стороне. Исследование решений показало, что в задаче с изоляцией в зависимости от соотношения геометрических размеров возможны два типа решений: конечной высоты или с вертикальной асимптотой. Также исследовались стационарные решения с помощью моделирования формообразования «гребешков» на обрабатываемой поверхности. Решена плоская задача электрохимической обработки для электрода-инструмента в виде фольги с щелью. Разработанные численно-аналитические методы и алгоритмы решения нестационарных задач позволяют на каждом временном шаге определять положение особых точек и скорости их движения, что дает возможность исследовать задачи с более сложной геометрией электрода-инструмента. Применение разработанных методов фильтрации численных результатов дало возможность найти закономерности и временные параметры при установлении стационарных и финальных форм обрабатываемой поверхности.

Математическая модель, позволяющая прогнозировать и контролировать процесс прецизионной электрохимической обработки (аналога течения жидкости с размыванием границы), построенная на основе гидродинамической аналогии, предложена в работе [9]. Модель основана на использовании скачкообразной функции анодного выхода по току и позволяет объяснить резкие очертания обработанной поверхности, не характерные для идеальной ЭХО. Разработанные методы позволили решить поставленные задачи во всей области определения исходных параметров и оценить погрешность численного решения.

Работа [10] посвящена модификации численно-аналитических методов решения задач нестационарной электрохимической обработки. Были разработаны методы, использующие две параметрические плоскости для определения искомых функций, формулу Келдыша–Седова, которые позволяют моделировать процессы стационарной и нестационарной электрохимической обработки с помощью электродов-инструментов различной формы, имеющими угловые точки. В результате численных исследований, включающих граничные режимы обработки, решены задачи копирования сегмента круга, прорезывания пазов круглым и пластинчатым электродом-инструментом. Впервые получены наборы данных в объеме, позволяющем создать на их основе упрощенные модели процессов формообразования в виде интерполя-

ционных зависимостей, позволяющих контролировать погрешность. Разработанные методы создания моделей дали возможность получать искомые параметры в условиях неодносвязности области задания данных численного эксперимента.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Методы проверки адекватности результатов вычислительного эксперимента заключаются в том, что в отличие от применяемого на практике сравнения приближенных значений, проверяется попадание тестового решения в полученный интервал или факт пересечения интервалов неопределенности, что согласно полученным оценкам, позволяет уменьшить вероятность необнаружения ошибки на несколько порядков. В качестве метода тестирования предлагается применение нескольких (2–4) методов решения одной и той же задачи, оценки погрешности каждого результата с помощью фильтрации или полной идентификации и сравнении полученных интервалов неопределенности (проверке их пересечения). Отсутствие противоречия означает, что дополнительная погрешность не обнаружена. Но из этого не следует, что ошибка отсутствует. Погрешность может существовать в каждом результате и иметь значение, большее допустимого. Но дополнительные (ненаблюдаемые) погрешности разных результатов должны совпадать с точностью вычислений. В качестве численной характеристики достоверности используется вероятность того, что фактическая погрешность не выходит за указанные пределы.

В работе [11] разработаны методы численной фильтрации и идентификации результатов вычислительного эксперимента, заключающиеся в способе получения и обоснования оценок погрешности и эталона с помощью двухэтапной численной фильтрации на основе многокомпонентной модели погрешности. В отличие от методов экстраполяции и регуляризации это позволяет получить непротиворечивые оценки составляющих погрешностей искомых параметров. Предложены методы проверки адекватности результатов вычислительного эксперимента, в которых в отличие от применяемого на практике сравнения приближенных значений, проверяется попадание тестового решения в полученный интервал или факт пересечения интервалов неопределенности. Это позволяет уменьшить вероятность необнаружения ошибки на несколько порядков и существенно повысить эффективность тестирования. С помощью многокомпонентного анализа получены достоверные данные о закономерностях накопления погрешности округления, интерполяции и др. С помощью разработанных методов многокомпонентного анализа и предложенных численно-аналитических методов, при решении известной задачи (численное обоснование гипотезы Стокса) выявлены четыре новых компоненты модели крутых волн, что позволило с высокой точностью аппроксимировать их характеристики. Проведено комплексное исследование модели течения жидкости в центробежной форсунке и разрешен парадокс, связанный с принципом максимального расхода. Найдены решения с расходом, отличающимся от максимального на 2–3% при сверхкритическом режиме течения. Проведенный многокомпонентный анализ задач электрохимической обработки дал возможность получить новые приближенные аналитические модели нестационарных процессов электрохимической обработки.

Последние идеи профессора Житникова реализованы в новом решении задачи о солитоне Стокса, где вместо степенного ряда, использованного в известных численно-аналитических методах, применен интеграл Шварца. Вместе с этим была увеличена длина мантиссы машинного слова, что позволило повысить точность и подтвердить результаты оценок, полученных ранее с помощью фильтрации численных данных. Применение фильтрации позволило увеличить гарантированную точность положения экстремумов зависимостей параметров кавитационных течений с 2-х до 6 значащих цифр. Также была рассмотрена и решена осесимметричная задача об электрохимической обработке точечным электродом-инструмент ом при немонотонной зависимости

анодного потенциала от плотности тока. Сравнение полученных результатов с натурным экспериментом показало их качественное совпадение. Результаты численных расчетов копирования круглого в сечении электрода-инструмента позволили определить форму заготовки в различные моменты времени и диапазон безразмерного времени, в котором квазистационарное решение совпадет с нестационарным. Кроме этого, построена модель нового технологического процесса электрохимической обработки вращающимся электродом-инструментом. Вращение электрода-инструмента создает условия для более интенсивного обмена электролита в рабочей области. При этом рассматривалась нестационарная задача электрохимической обработки с помощью пластинчатого электрода-инструмента конечной толщины. Проведенные численные исследования технологий электрохимической обработки вращающимся электродом-инструментом показали, что резкое изменение траектории движения электрода-инструмента является опасным маневром с точки зрения возникновения короткого замыкания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За тридцатилетний период плодотворной работы научного коллектива под руководством профессора В. П. Житникова в УГАТУ было разработано множество численно-аналитических методов и их модификаций, поставлено и решено огромное количество теоретических и прикладных задач математического моделирования различных процессов в области гидродинамики и электрохимической обработки, сформировалось новое научное направление решения проблем оценки погрешности и обоснования достоверности результатов вычислений. Многообразие постановок задач, методов и подходов, алгоритмов и программных комплексов позволило достичь замечательных результатов в области математического моделирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнялись в сотрудничестве с институтом теории и технологии электрохимической обработки (УГАТУ) и ООО ЕСМ при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части госзадания образовательным организациям высшего образования, при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00356 (2017–2019 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шерыхалина Н. М.** Математическое моделирование течений весомой жидкости со свободными поверхностями, индуцированных погруженным источником: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 1996. **[** N. M. Sherykhalina, *Mathematical modeling of ponderable fluid flows with free surfaces, induced by a submerged source:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 1996. **]**

2. **Шерыхалин О. И.** Методы оценки достоверности вычислительных экспериментов при математическом моделировании течений весомой жидкости: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 1997. **[** O. I. Sherykhalin, *Methods for assessing the reliability of computational experiments in ponderable fluid flows mathematical modeling:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 1997. **]**

3. **Ураков А. Р.** Автомодельное решение нестационарных задач электрохимической обработки: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 1996. **[** A. R. Urakov, *Self-similar solution of non-stationary electrochemical processing's problems:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 1996. **]**

4. **Федорова Г. И.** Методы расчета формообразования поверхности при нестационарной электрохимической обработке: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 2004. **[** G. I. Fedorova, *Methods for calculating surface shaping during non-stationary electrochemical processing:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2004. **]**

5. **Зиннатуллина О. Р.** Численно-аналитические методы решения осесимметричных задач Хеле-Шоу: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 2006. **[** O. R. Zinnatullina, *Numerical-analytical methods for solving axisymmetric Hele-Show problems:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2006. **]**

6. **Ошмарин А. А.** Применение принципа максимального расхода в задачах гидродинамики, содержащих неопределенность: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 2006. **[** A. A. Oshmarin, *Application of the principle of maximum flow rate in fluid dynamics problems with uncertainty:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2006 .**]**

7. **Заико Н. А.** Комплексный подход к оценке погрешностей в задаче численного анализа данных натурного эксперимента: дисс. … канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2008. **[** N. A. Zaiko, *An integrated approach to the estimation of errors in the problem of numerical analysis of the data of a full-scale experiment:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2008. **]**

8. **Поречный С. С.** Гидродинамическое и геометрическое моделирование формообразования выступов при электрохимической обработке: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 2009. **[** S. S. Porechny *Hydrodynamic and geometric modeling of the formation of protrusions during electrochemical machining:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2009. **]**

9. **Ошмарина Е. М.** Применение гидродинамической аналогии для моделирования анодного растворения при прецизионной электрохимической обработке: дисс. … канд.

физ.-мат. наук, Уфа: УГАТУ, 2011. **[** E. M. Oshmarina *Application of hydrodynamic analogy for modeling anodic dissolution in precision electrochemical machining:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2011. **]**

10. **Муксимова Р. Р.** Приемы создания математических моделей стационарных и нестационарных процессов применительно к задачам электрохимического формообразования: дисс. … канд. физ.-мат. наук. Уфа: УГАТУ, 2012. **[** R. R. Muksimova *Methods for creating mathematical stationary and non-stationary processes models in relation to the problems of electrochemical shaping:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2012. **]**

11. **Шерыхалина Н. М.** Математическое моделирование технических объектов и процессов на основе методов многокомпонентного анализа результатов вычислительного эксперимента: дисс. … д-р. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2012. **[** N. M. Sherykhalina, *Mathematical modeling of technical objects and processes based on the computational experiment results multicomponent analysis methods:* Cand. Diss. Abstr., (in Russian). Ufa: USATU, 2012. **]**

ОБ АВТОРАХ

ШЕРЫХАЛИНА Наталия Михайловна, проф. каф. Вычислительной математики и кибернетики. Дипл. инженер-системотехник (УГАТУ, 1993). Д-р техн. наук по мат. мод., числ. мет. и компл. программ (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. мат. мод. течений жидкости и электрохимического формообразования, численных методов и оценок погрешности.

ФЕДОРОВА Галина Ильясовна, доц. каф. Высокопроизводительных вычислительных технологий и систем. Дипл. Инженер-математик (УГАТУ, 2000). Канд. физ.- мат. наук по мат. мод., числ. мет. и компл. программ (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. мат. мод. процессов электрохимического формообразования.

ПОРЕЧНЫЙ Сергей Сергеевич, доц. каф. Высокопроизводительных вычислительных технологий и систем. Дипл. инженер по специальности системы автоматизированного проектирования (УГАТУ, 2006). Канд. физ.- мат. наук по мат. мод., числ. мет. и компл. программ (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. мат. мод. процессов электрохимического формообразования.

METADATA

Title: The hydrodynamics and electrochemical processing processes mathematical modeling by numerical-analytical methods (according to USATU scientific schools materials)

Authors: N. M. Sherykhalina[1], G. I. Fedorova[2], S. S. Porechny[3]

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: [1]n_sher@mail.ru, [2]g_fed@mail.ru, [3]porechny@mail.ru

Language: Russian.

Source: SIIT (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 3, no. 2 (6), pp. 59-66, 2021. ISSN 2686-7044(Online), ISSN 2658-5014(Print).

Abstract: The key problem of modern science is the efficiency improvement the of mathematical modeling methods, as well as the development of tools for optimal combination of analytical solutions and the results of computational experiments. One of the important problems in this direction is the development of tools for monitoring and proving the reliability of the obtained parameter values, taking into account all known sources of inadequacy, starting from the stage of formalization and problem formulation and ending with the analysis of the obtained results. Practice shows that even if there are strict proofs of the existence and uniqueness of the solution, the convergence of the approximate result to the exact one, there are many sources of uncontrolled error. These are errors in the formulation or discretization of the problem, programming errors, computational errors, etc. The using of statistical methods for estimating systematic and random errors over a set of random values is very difficult for two reasons: the number of different methods for finding the result is too small to obtain sufficiently accurate statistical estimates and, in addition, there is no standard to compare numerical results.This review article presents the results of research in the field of formalization of the validity of numerical solutions to problems of hydrodynamics and electrochemical machining, carried out within the framework of the scientific school of UGATU under the leadership of Honored Scientist of the RB, Doctor of Ph. D., Professor V. P. Zhitnikov.

Key words: numerical-analitical methods; error estimate; numerical filtration; electrochemical machining.

About authors:

SHERYKHALINA, Nataliya Mikhailovna, Prof., Dept. Computational Mathematics and Cybernetics, Faculty of Computer science and robotics, UGATU. Dipl. System engineer (UGATU, 1993). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2012).

FEDOROVA, Galina Ilyasovna, Docent, Dept. of High-performance computing technologies and systems, Common Science Faculty, UGATU. Dipl. Mathematics engineer (UGATU, 2000). Cand. of Phis.-Math. Sci. (UGATU, 2004).

PORECHNY, Sergey Sergeevich, Docent, Dept. of High-performance computing technologies and systems, Common Science Faculty, UGATU. Dipl. computer-aided design engineer (UGATU, 2006). Cand. of Phis.-Math. Sci. (UGATU, 2009).