

## ОТЗЫВ

официального оппонента Моренко Ирины Вениаминовны  
на диссертацию Соколовой Александры Алексеевны «Математическое  
моделирование течений жидкости и электрохимического формообразования  
с использованием методов численной фильтрации», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
1.2.2. Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

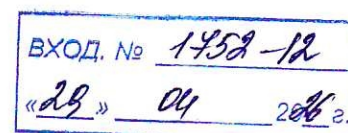
Разработка математических моделей и численно-аналитических методов для задач электрохимической размерной обработки, а также создание на их основе специализированного комплекса программ для прогнозирования параметров данного процесса является **актуальной темой исследования** в условиях импортозамещения, необходимости сокращения сроков вывода продукции на рынок, дальнейшего совершенствования высокоточной технологии, востребованной в машиностроении, медицине, авиастроении, приборостроении и других отраслях промышленности. Традиционные подходы к проектированию технологических режимов зачастую опираются на эмпирические зависимости или упрощенные стационарные модели, что не позволяет в полной мере учитывать реальное поведение системы при электрохимическом формообразовании. В диссертационной работе показана целесообразность применения алгоритма численной фильтрации к результатам вычислительного эксперимента, при этом автор последовательно использует данный метод при анализе и оценке погрешности решений плоских и осесимметричных задач электрохимического формообразования.

**Научная новизна полученных результатов.** В диссертации представлены новые научные результаты в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Соколова А.А. применила метод численной фильтрации к результатам решения задачи о солитоне Стокса, которые были получены новым численно-аналитическим методом. Это позволило верифицировать ранее полученные оценки погрешности и обосновать применимость метода для задач электрохимического формообразования со сложными граничными условиями. Тем самым апробирована методика постпроцессорного уточнения численных результатов, обеспечивающая повышение достоверности получаемых решений.

Диссертантом впервые решена осесимметричная задача электрохимической обработки точечным электродом-инструментом плоской заготовки в пассивирующем электролите. Было найдено распределение плотности тока по поверхности анода. Проведена оценка погрешности рассчитанного значения потенциала и напряженности в центральной точке границы анода.

При математическом моделировании копирования круглого электрод-инструмента получено квазистационарное решение, которое позволяет определять геометрию обрабатываемой поверхности в различные моменты



времени, а также диапазон безразмерного времени, в котором квазистационарная аппроксимация адекватно воспроизводит нестационарный процесс.

Решение нестационарной задачи электрохимического формообразования с учетом поворота траектории вращающегося электрода-инструмента позволило выявить критические значения технологических параметров, таких как угловая скорость вращения при импульсном включении напряжения на части периода вращения, интервалы отключения подачи напряжения, при которых возникают неустойчивые режимы обработки, сопровождающиеся самопересечением границ или коротким замыканием.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечиваются строгой постановкой задач, корректным использованием современных численных методов, сопоставлением решений, найденных разными методами, а также согласием полученных решений с экспериментальными данными.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы состоит в развитии численно-аналитических методов решения задач гидродинамики и электрохимического формообразования, обосновании применения численной фильтрации как инструмента постпроцессорной обработки результатов вычислительных экспериментов, а также в расширении аналитического аппарата для решения нестационарных краевых задач электрохимического формообразования со сложными граничными условиями.

Разработанные численно-аналитические методы решения задач гидродинамики и электрохимического формообразования и созданные на их основе комплексы прикладных программ востребованы на специализированных предприятиях, в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро, занимающихся разработкой станков с ЧПУ, что подтверждает практическую значимость работы. Результаты исследований способствуют сокращению времени отладки электрохимической обработки деталей на 30%, оптимизации траектории движения электрод-инструмента, минимизируют вероятность пересечения границ анода и катода. Результаты работы внедрены на отечественных предприятиях. Также они могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений на направлениях, связанных с вычислительной математикой, математическим моделированием и технологиями машиностроения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы, трех приложений. Общий объем работы – 137 страниц, рисунков – 84, таблиц – 6. Список литературы включает 106 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна, практическая значимость и обоснована их достоверность.

**Первая глава** посвящена проблемам математического моделирования электрохимического формообразования, описан и проанализирован алгоритм

численной фильтрации как инструмента исследования математических моделей. Продемонстрирована эффективность применения фильтрации на примере решения задачи кавитационного обтекания тонкой воздухоопорной оболочки цилиндрической формы.

**Во второй главе** предложен новый численно-аналитический метод решения задачи о солитоне Стокса, в котором традиционное представление искомой функции степенным рядом в круге заменено применением интеграла Шварца на полосе с выделением особенностей. Полученные с повышенной точностью решения были сравнены с предыдущим, уточненным с помощью фильтрации, решением. Подробно описан алгоритм и комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента.

**В третьей главе** рассматриваются две задачи моделирования электрохимического формообразования. Предложен метод решения квазистационарной задачи копирования круглого электрода-инструмента и решена осесимметричная задача обработки точечным электродом в пассивирующем электролите с немонотонной зависимостью плотности тока, проведена оценка погрешности полученных значений параметров.

Нестационарная задача прорезания пазов вращающимся электродом-инструментом рассмотрена в **четвертой главе**, объяснены причины возникновения волнообразности боковой поверхности, исследованы режимы импульсного включения напряжения, найдены значения параметров процесса, при которых возможно самопересечение границ.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе. **Приложение** содержит свидетельства о регистрации программ, справки о внедрении полученных результатов, листинг программы решения задачи о солитоне Стокса.

#### **Замечания по содержанию диссертации.**

1. Электрохимическое формообразование – сложный процесс, включающий множество физических явлений и аспектов: наличие электрического поля, теплообмена, движение электролита в рабочей области между катодом и анодом, свойства электролита, образование на поверхности анода труднорастворимой оксидной пленки, формирование газовых пузырьков, накопление в зазоре шлама и т.д. Эти факторы и процессы оказывают взаимное влияние друг на друга. Поэтому перед тем, как перейти к моделированию процесса электрохимического формообразования желательнее подробно описать аппаратное оформление процесса, его суть и выделить задачи со строгим обоснованием принятых допущений. В работе также не обосновано допущение об использовании модели идеальной жидкости для задачи об обтекании цилиндрической оболочки.

2. Не поясняется, при каких числах Рейнольдса решается задача об обтекании цилиндрической оболочки (п. 1.2). В ходе обсуждения полученных в главе 4 результатов не уточняется, для какого диапазона определяющих параметров (размеры и скорость электрод-инструмента  $V_c$ , угловая скорость вращения  $\omega$ , начальный зазор между катодом и анодом) справедливо решение.

3. Недостаточно внимания уделено проверке сеточной сходимости решения. На стр. 88 написано: «Было отмечено, что при отсутствии регулирования расположения узлов, несмотря на их начальное сгущение, при увеличении  $\tau$  происходит расхождение узлов, что приводит к потере точности и устойчивости решения». В чем состоит принцип регулирования расположения узлов?

4. В тексте не даны пояснения некоторым параметрам, например,  $U$  (стр. 22),  $p$  (стр. 22), точка наблюдения и точка расположения источника (стр. 82), параметр  $k$  в разных главах определяется по-разному (формулы 1.1.1. и 4.1.1). На стр. 42 при постановке задачи о солитоне Стокса величина  $V_\infty$  обозначена как скорость струи на бесконечности, однако согласно работе [Longuet-Higgins M.S., Fenton J.D. Proc. R. Soc. Lond. 1974. V.340. P. 471-493], цитируемой диссертантом, это скорость волны. Плотность тока на рис. 3.5.2-3.5.4 обозначена символом « $j$ », а в тексте – « $J$ », как связаны эти параметры?

5. В подписях к рисункам 4.4.2 и 4.4.3 на стр. 90 значится «Визуализация погрешности», но на них, по-видимому, изображена форма обрабатываемой поверхности. Желательно пояснить, в данном случае увеличение погрешности при росте  $\tau_{\max}$  связано с неточностью математического описания, ошибками в ходе решения задачи или используемые методы не обладают достаточной устойчивостью к накоплению погрешности при расчете длительных процессов.

6. На стр. 89 говорится, что «погрешность визуально не обнаруживается». Согласно определению, погрешность – это разница между полученным и истинным значением какой-либо величины. Желательно привести количественное значение погрешности. В данном случае при расчете погрешности не ясно, какое значение экспериментальное или аналитическое считается истинным?

7. На рисунках 4.6.3, 4.6.10, 4.6.11 нанесены линии разными цветами, но в подписи к рисунку не поясняется, чему каждая из этих линий соответствует.

8. Содержатся некорректно составленные предложения, например, на стр. 20: «Поскольку стационарное электрическое поле в электролите обладает свойствами соленоидальности и потенциальности, математическое моделирование процесса проводится на основе уравнения Лапласа». Его лучше переформулировать, например, так, как это сделано на стр. 72: «При допущении об однородности среды электрическое поле является потенциальным и соленоидальным...». В тексте имеются повторы (стр. 82 и 83), опечатки.

9. В списке цитируемой литературы из 106 наименований 29 опубликованы за последние 10 лет, причем большинство из них выполнено диссертантом с соавторами. В обзорной части работы следовало больше внимания уделить новейшим методам математического моделирования электрохимической обработки, опубликованным другими научными группами, в том числе, и за рубежом.

Указанные замечания не подвергают сомнению полученные результаты и не снижают общую положительную оценку диссертационного исследования.

### **Заключение**

Диссертационная работа Соколовой Александры Алексеевны «Математическое моделирование течений жидкости и электрохимического

формообразования с использованием методов численной фильтрации» выполнена на высоком научном уровне и является законченным научно-квалификационным исследованием, обладающим актуальностью, научной новизной, а также теоретической и практической значимостью. По теме диссертации опубликовано 26 работ, из которых 7 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и 3 статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация полностью соответствует области исследования научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты, полученные в диссертации, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности: п. 2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п. 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 7 «Качественные или аналитические методы исследования математических моделей»»; п. 8 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента». Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы. Диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Соколова Александра Алексеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
лаборатории моделирования технологических процессов  
Института механики и машиностроения – структурного  
подразделения Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский  
научный центр Российской академии наук»

И.В. Моренко  
23.04.2026

Моренко Ирина Вениаминовна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»  
420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31  
Тел.: +7(843)236-52-89, email: info@imm.knc.ru; <https://knc.ru>

