НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ ИМ. Г.Е. ПУХОВА На правах рукописи УДК 519.642 + 004.021: 004.9: 550.8.053 Мосенцова Людмила Викторовна МЕТОДЫ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ Специальность 01.05.02 Математическое моделирование и вычислительные методы Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Научный руководитель: Верлань Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор Киев — 2015 2 СОДЕРЖАНИЕ ВВЕДЕНИЕ.............................................................................................................. 4 РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ................................... 11 1.1. Задача интерпретации наблюдений...................................................... 11 1.2. Интегральные модели представления задач интерпретации............. 24 1.3. Методы и средства решения задач интерпретации наблюдений ...... 29 1.4. Выводы к разделу ................................................................................... 37 РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ....................................................................... 40 2.1. Метод модельных экспериментов для выбора параметра регуляризации при решении нелинейных интегральных уравнений І рода.. 40 2.2. Метод модельных экспериментов при решении нелинейных интегральных уравнений типа Фредгольма І рода на основе метода Тихонова………………………………………………………………………… 45 2.3. Метод модельных экспериментов при решении нелинейного интегрального уравнения типа Фредгольма І рода на основе модифицированного метода Лаврентьева-Васина ............................................ 55 2.4. Квадратурные алгоритмы решения нелинейных интегральных уравнений типа Фредгольма IІ рода.................................................................... 59 2.5. Итерационные алгоритмы решения нелинейных интегральных уравнений типа Фредгольма IІ рода.................................................................... 60 2.6. Модифицированный метод простых итераций с предварительной оптимизацией начального приближения............................................................ 65 2.7. Выводы к разделу ................................................................................... 70 РАЗДЕЛ 3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ................................................................. 71 3.1. Применение метода модельных экспериментов ................................. 71 3 3.2. Квадратурные алгоритмы восстановления входных сигналов нелинейных устройств интерпретации наблюдений на основе решения уравнений Вольтерра-Гаммерштейна I рода...................................................... 75 3.3. Алгоритм численного решения нелинейных интегральных уравнений типа Вольтерра І рода методом коллокаций ................................... 85 3.4. Приведение нелинейных интегральных уравнений типа Вольтерра I рода к уравнениям II рода .................................................................................... 88 3.5. Прямые алгоритмы численного решения нелинейных интегральных уравнений типа Вольтерра IІ рода на основе квадратур................................... 90 3.6. Итерационные алгоритмы решения нелинейных интегральных уравнений типа Вольтерра IІ рода....................................................................... 95 3.7. Выводы к разделу ................................................................................. 100 РАЗДЕЛ 4. ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ. РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ.................................................................................................................. 103 4.1 Сравнительный анализ компьютерных средств математического моделирования..................................................................................................... 103 4.2. Структура комплекса программ.......................................................... 104 4.3. Организация модулей комплекса программ в среде MATLAB ...... 109 4.4. Описание программных модулей ....................................................... 112 4.5. Решение прикладных задач ................................................................. 139 4.6. Выводы к разделу ................................................................................. 144 ВЫВОДЫ............................................................................................................. 146 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ......................................... 149 Приложение А ..................................................................................................... 161 Приложение Б...................................................................................................... 162 4 ВВЕДЕНИЕ Актуальность темы. Интенсивное развитие и расширение области применения современных систем наблюдения в значительной мере определяются совершенствованием методов и средств интерпретации первичных результатов, регистрируемых системой. Высокое качество результатов решения задач интерпретации достигается посредством улучшения таких показателей как точность, разрешающая способность, быстродействие. Современные процессы интерпретации результатов наблюдений порождаются методами математической обработки сигналов и реализуются в цифровом виде. Методика основана на использовании математической модели измерительной части системы наблюдения и построении вычислительного процесса восстановления «истинного» входного сигнала посредством обращения модели, т.е. путем решения задачи, обратной моделированию «прямого» процесса измерения. Решение данной обратной задачи представляет собой процесс компенсации искажающих свойств (характеристик) преобразователей. Процесс решения задачи осуществляется программой, реализуемой в компьютерной части системы (процессор, микропроцессор). Наиболее распространенными и эффективными на практике моделями задачи интерпретации результатов наблюдений являются интегральные уравнения Фредгольма І рода — для случая пространственно распределенных входных сигналов, а также интегральные уравнения Вольтерра І рода — в случае динамических задач интерпретации. Задачи решения уравнений данного класса являются некорректно поставленными (некорректными), т.е. относятся к задачам повышенной трудности, требующим выполнения специфических условий корректности. Данные трудности усугубляются при решении нелинейных задач интерпретации, описываемых нелинейными интегральными уравнениями I рода. Численные методы решения интегральных уравнений І рода основаны на применении методов регуляризации, состоящих, как правило, в 5 преобразовании исходных уравнений к близким к ним (в некотором смысле) интегральным уравнениям II рода, удовлетворяющим условиям корректности благодаря введению так называемых параметров (коэффициентов) регуляризации. Указанные параметры определяются посредством определенных вычислительных процедур, вытекающих из целого ряда методов регуляризации, составляющих в совокупности достаточно глубоко разработанную теорию регуляризации некорректных задач. Основы и методы данной теории, главным образом, применительно к линейным задачам, предложены и развиты в работах Апарцина А.С. [1], Бакушинского А.Б. [4], Васина В.В. [11], Верланя А.Ф. [13], Винера В. [34], Гончарского А.В. [25], Иванова В.К. [34], Лаврентьева М.М. [43, 44], Сизикова В.С. [81, 82], Тихонова А.Н. [85, 86], Филипса Я.И. [108], Яголы А.Г. [86, 87] и др. Методы регуляризации базируются в своем большинстве на оптимизационном подходе, существенный вклад в развитие которого внесли работы Гаращенко Ф.Г. [21], Задираки В.К. [29, 30, 31], Иванова В.В .[33], Наконечного А.Г.[67, 5], Пшеничного Б.Н. [76, 77] и др. Вместе с тем, ввиду объективных трудностей область исследований по теории и методам регуляризации применительно к нелинейным интегральным уравнениям І рода оказывается ограниченной по сравнению с исследованиями линейных задач, чему соответствует и количество публикаций. Тем не менее, существенные результаты в данном направлении получены в работах Бакушинского А.Б. [3], Васина В.В. [11], Кокурина М.Ю. [3], Леонова А.С. [46, 87], Лукьяненко В.А. [104], Сизикова В.С. [81], Тихонова А.Н. [87], Яголы А.Г. [87] и др. Практически все численные методы, приемы и процедуры определения параметра регуляризации ввиду их оптимизационного характера связаны с проведением вычислительных экспериментов, что свидетельствует о важности и определенной перспективности данного этапа в совокупности всех вычислений, приводящих к решению обратных задач.. При этом важными направлениями в усовершенствовании этого этапа вычислений, 6 который применительно к рассматриваемой задаче в части определения параметра регуляризации можно назвать методом модельных экспериментов, представляются формализация и повышение уровня универсальности, т. е. способности совмещения с реализацией основных традиционных методов регуляризации, что подтверждается имеющимся положительным опытом решения прикладных задач и рядом публикаций, относящихся к линейному случаю задачи интерпретации результатов наблюдений. Следует также отметить, что распространенные в широкой практике математические пакеты программ компьютерного моделирования не содержат средств для решения интегральных уравнений, что вносит дополнительные трудности в разработку, исследование и практическое применение компьютерных средств решения задач интерпретации наблюдений, особенно в нелинейной постановке. Таким образом, актуальной является научно-техническая задача разработки численных методов, алгоритмов и программных средств решения нелинейных задач интерпретации наблюдений, представленных математическими моделями в виде нелинейных интегральных уравнений первого рода, путем построения алгоритмов регуляризации на основе метода модельных экспериментов. Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационное исследование проводилось в Институте проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины в рамках научноисследовательской работы “Математические методы и компьютерные средства модельной поддержки разработок систем измерения и управления испытательных стендов силовых установок энергетического и транспортного назначения” (№ д/р 0109U008340). Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности методов моделирования процессов интерпретационной обработки сигналов в нелинейных системах наблюдения на основе разработки алгоритмов и программных средств решения 7 интегральных уравнений первого рода типа Фредгольма и Вольтерра посредством модельных экспериментов. Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи: − анализ методов решения нелинейных задач интерпретации наблюдений; обзор существующих подходов и методов, а также достигнутых результатов при решении проблемы, обоснование научно-технической задачи исследования выбранного в работе подхода к ее решению; анализ возможностей серийных универсальных сред для реализации интегральных моделей решения задач интерпретации наблюдений; − разработка и формализация расчетной схемы метода вычислительных экспериментов для определения параметра регуляризации при решении нелинейных некорректных обратных задач в интегральной постановке; создание методов и численных алгоритмов решения задач интерпретации результатов наблюдений, описывающихся нелинейными интегральными уравнениями І рода, на основе использования эффективных методов регуляризации с применением метода вычислительных экспериментов; − создание численных алгоритмов решения динамических задач интерпретации результатов наблюдений, которые описываются нелинейными интегральными уравнениями типа Вольтерра І рода, на основе эффективных методов дискретизации моделей; − создание комплекса программ компьютерного моделирования для решения и исследования нелинейных задач интерпретации наблюдений, а также решение тестовых и практических задач. Объектом исследования является процесс решения нелинейных задач интерпретации результатов наблюдений. Предметом исследования являются методы, алгоритмы и программные средства решения задач интерпретации наблюдений, которые описываются нелинейными интегральными уравнениями I рода. Методы исследования. При проведении исследований используются 8 методы: методы вычислительной математики (дискретизация интегральных уравнений математических моделей, решение систем линейных алгебраических уравнений, решение систем нелинейных алгебраических уравнений); методы теории оптимизации (применение оптимизационного алгоритма определения начального приближения в итерационном методе решения интегральных уравнений ІI рода); методы математического моделирования (обоснование и формализация метода модельных экспериментов); методы программной инженерии (разработка программного моделирующего комплекса); методы вычислительного эксперимента (апробация и исследование разных форм интегральных моделей). Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: - впервые предложен, реализован и эффективно применен метод модельных экспериментов при решении интегральных уравнений типа Фредгольма І рода в нелинейных задачах интерпретации наблюдений; - усовершенствованы регуляризационные алгоритмы (процедуры) в методе Тихонова для решения интегральных уравнений в нелинейных задачах интерпретации наблюдений на основе определения параметра регуляризации с помощью метода модельных экспериментов, что позволяет повысить эффективность процессов и результатов решения в сравнении с исходным (базовым) методом; - получил дальнейшее развитие регуляризационный метод ЛаврентьеваВасина для решения интегральных уравнений в нелинейных задачах интерпретации наблюдений на основе определения параметра регуляризации с помощью метода модельных экспериментов, что позволяет повысить точность результатов решения в сравнении с исходным (базовым) методом; - на основе применения оптимизационной процедуры поиска начального приближения усовершенствован вычислительный процесс метода простых итераций для численной реализации регуляризированных моделей процесса интерпретации (нелинейные интегральные модели типа Фредгольма ІІ рода), 9 что позволяет повышать скорость сходимости; - впервые разработан и исследован набор алгоритмов решения нелинейных интегральных уравнений, являющийся эффективной основой построения исследовательских и прикладных программ (в частности, совместимых с моделирующей средой MATLAB) для решения нелинейных задач интерпретации наблюдений в интегральной постановке; разработан комплекс соответствующих программных средств. Практическое значение полученных результатов работы заключается в том, что созданные методы и компьютерные средства позволяют решать широкий класс задач интерпретации результатов наблюдений путем компьютерной реализации математических моделей в виде нелинейных интегральных уравнений типа Фредгольма и Вольтерра І рода. Полученные методы и алгоритмы внедрены в МДВВП «Плазер», ПП «Видикаст». Личный вклад соискателя. Все результаты диссертационной работы, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Работы [63, 65, 64, 66, 56, 57, 60, 55, 61, 58, 54, 59, 62] написаны самостоятельно. В опубликованных в соавторстве работах лично диссертанту принадлежат следующие результаты: [17] — модифицированный метод простой итерации, алгоритм реализации метода в среде MATLAB; [16] — программная реализация метода модельных экспериментов; [15] — модификация метода модельных экспериментов для решения систем интегральных уравнений І рода. Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах отдела моделирования динамических систем Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины (Киев, 2008-2015 г.); на международной научной конференции “Современные проблемы математического моделирования, прогнозирование и оптимизация” (Каменец-Подольский, К-ПГУ, 2012 г., 2014 г.); на научно-технической 10 конференции “Моделирование” (Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, 2009 г. — 2011 г.); на международной научно-технической конференции “Моделирование” (Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, 2012 г.); на конференции молодых ученых по современным проблемам механики и математики имени академика Я.С. Пидстригача (Львов, Институт прикладных проблем механики и математики имени Я.С. Пидстригача НАН Украины, 2011 г.); на молодежной международной научной школе-конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2009 р.). Публикации. Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в 1 монографии и 15 научных работах, среди которых 9 — в профессиональных изданиях, 1 — в зарубежном издании, 5 — в тезисах и материалах научных конференций.

ВЫВОДЫ В диссертационной работе решена задача разработки численных методов, алгоритмов и программных средств решения нелинейных задач интерпретации наблюдений, представленных математическими моделями в виде нелинейных интегральных уравнений первого рода, путем построения алгоритмов регуляризации на основе метода модельных экспериментов. В частности, получены следующие результаты: 1. Проведен анализ проблемы усовершенствования систем наблюдения, который свидетельствует о том, что одним из эффективных путей повышения качественных показателей их функционирования есть развитие математических методов интерпретации результатов наблюдений с помощью решения задач восстановления сигналов, которые являются обратными задачами по отношению к задачам, которые выполняются измерительной частью. 2. Установлено, что наиболее продуктивными математическими моделями первичных измерительных процессов есть интегральные уравнения первого рода (типа Фредгольма и Вольтерра), решение которых лежит в основе задач и методов интерпретации результатов наблюдений. Нелинейные задачи интерпретации описываются уравнениями указанного класса в нелинейной постановке, которая, в совокупности с некорректностью обратных задач, создает важные трудности их решения, преодоление которых представляет актуальную научно-техническую задачу, которая решается в работе. 3. Предложено применение метода модельных экспериментов для решения задачи определения параметра регуляризации при решении нелинейных обратных задач для интегральных уравнений первого рода; метод модельных экспериментов представлен в виде полностью формализованной последовательности операций, которая приводит к получению необходимого (оптимального) значения коэффициента регуляризации; показана возможность модификации традиционных 147 регуляризационных методов решения интегральных уравнений первого рода на основе метода модельных экспериментов. 4. Предложен, реализован и эффективно применен метод модельных экспериментов при решении интегральных уравнений типа Фредгольма І рода в нелинейных задачах интерпретации наблюдений; при этом усовершенствованы регуляризационные алгоритмы по методу Тихонова для решения интегральных уравнений в нелинейных задачах интерпретации наблюдений на основе определения параметра регуляризации с помощью метода модельных экспериментов, что позволяет повысить эффективность процессов и результатов решения в сравнении с исходным (базовым) методом. 5. Получил дальнейшее развитие регуляризационный метод Лаврентьева-Васина для решения интегральных уравнений в нелинейных задачах интерпретации наблюдений на основе определения параметра регуляризации с помощью метода модельных экспериментов, что позволяет повысить точность результатов решения в сравнении с исходным (базовым) методом. 6. На основе применения оптимизационной процедуры поиска начального приближения усовершенствован вычислительный процесс метода простых итераций для численной реализации регуляризованных моделей процесса интерпретации (нелинейные интегральные модели типа Фредгольма ІІ рода), что позволяет повышать скорость сходимости. 7. Разработаны алгоритмы численной регуляризации математических моделей нелинейных динамических задач интерпретации результатов наблюдения в виде интегральных уравнений типа Вольтерра І рода на основе метода коллокаций, что обеспечивает возможность использования алгоритмов для широкого класса ядер, получение необходимых показателей точности решений в зависимости от свойств решаемых задач. 8. Предложены алгоритмы решения нелинейных динамических задач интерпретации наблюдений в форме регуляризированных зависимостей в 148 виде нелинейных уравнений Вольтерра ІІ рода на основе применения модификации итерационного метода Ньютона-Канторовича, что обеспечивает значительное ускорение итерационного процесса. 9. На основе модульного принципа и с использованием моделирующей среды MATLAB разработан комплекс программ, который обеспечивает проведение вычислительных экспериментов по исследованию предложенных алгоритмов решения рассмотренного класса нелинейных задач интерпретации результатов наблюдений, описываемых интегральными уравнениями І рода; с помощью предложенных математических методов, алгоритмов и разработанных программных средств решен ряд прикладных задач: задача определения границы области разделения двух сред с разными плотностями по аномалии силы тяжести; задача определения формы источника тепла по внешней температурной аномалии