

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГАОУ ВО

«Волгоградский государственный университет», доктор экономических наук, доцент

В.А. Дзедик



2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Солдатовой Екатерины Александровны «Разработка методов и алгоритмов численного исследования неклассических стохастических линейных динамических моделей», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования Е.А. Солдатовой обусловлена несколькими аспектами. Во-первых, наличие большого количества прикладных задач, для исследования которых используются математические модели, учитывающие случайное внешнее воздействие. Во-вторых, необходимость использования результатов современных математических методов для аналитического и численного исследований стохастических математических моделей. Третье – это важность алгоритмов обработки информации и системного анализа результатов, получаемых в ходе проведения комплекса вычислительных экспериментов. Отметим, что для описания и моделирования большого числа физических, технических и технологических процессов уже несколько десятков лет применяют уравнения соболевского типа. В диссертационном исследовании рассмотрены три стохастические модели, в основе которых лежат уравнения соболевского типа с различными начально-краевыми условиями, а именно, стохастическая модель Баренблатта – Желтова – Кочиной с условием Коши –

Дирихле и описывающая процессы фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах; стохастическая модель Осколкова, рассмотренная на геометрическом графе с условием Шоуолтера – Сидорова, которая изучает динамику скорости и давления несжимаемой вязкоупругой жидкости, движущейся по трубопроводу; линейная стохастическая модель Хоффа, рассмотренная на геометрическом графе с начально-конечным условием и позволяющая найти отклонение от вертикали двутавровых балок в конструкции.

Аналитические и численные исследования указанных неклассических стохастических моделей в настоящее время развиваются по двум направлениям. В одном из них используется понятие «белого шума», как производной Нельсона – Гликлиха винеровского **К**-процесса. Этот подход в последние годы получил широкое распространение для стохастических уравнений соболевского типа в работах Г.А. Свиридюка, А. Фавини, А.А. Замышляевой, С.А. Загребинной, Н.А. Манаковой, Т.Г. Сукачевой, и для стохастических систем леонтьевского типа в работах Ю.Е. Гликлиха, Е.Ю. Машкова, Г.А. Свиридюка, А.Л. Шестакова, А.А. Замышляевой, А.В. Келлер, Н.А. Манаковой.

В рамках другого направления развивается подход Ито – Стратоновича – Скорохода. Он является одним из самых первых направлений исследования невырожденных стохастических уравнений в конечномерном случае и считается в настоящее время классическим. В исследованиях G. Da Prato, J. Zabczyk подход Ито – Стратоновича – Скорохода применен в бесконечномерном случае. В работах И.В. Мельниковой стохастические уравнения исследуются в пространствах Шварца, при этом используется традиционный подход к понятию белого шума, как обобщенной производной винеровского процесса. М. Kovacs и S. Larsson, используя подход Ито – Стратоновича – Скорохода, исследовали невырожденные модели математической физики. В последнее десятилетие в работах Г.А. Свиридюка, А.А. Замышляевой, С.А. Загребинной в рамках этого подхода исследуются неклассические стохастические модели, в

диссертационной работе эти методы развиваются для исследования указанных математических моделей.

В стохастических моделях, являющимися объектами исследования, рассматривается случайное внешнее воздействие. Отметим, что такой подход актуализируется и развитием прикладных задач, например, в рамках гидродинамических исследований трещиновато-пористых пластов и сложных систем «пласт – скважина – коллектор». Большое количество работ и разнообразие методов в этих исследованиях обусловлены и сложностью систем, и поиском менее затратных и трудоемких методов гидрогеологических исследований, к которым относят опытные откачки, наливы, нагнетания, расходомерия. В последние годы эффективными признаны гидродинамические методы с использованием импульсного возбуждения скважин без забора жидкости. Изменения уровня жидкости могут спровоцировать землетрясение, импульсную регенерацию скважин, отдавливание столба воды сжатым воздухом и как следствие разгерметизацию устья скважины и т.д.

Вместе с тем у методов, использующих импульсно-волновое воздействие в скважине, есть и недостатки, к которым относятся малая информативность и низкая точность определения параметров трещиновато-пористой среды. В связи с чем, для повышения точности, используются различные методы гидропрослушивания для оценки скачка давления воды в наблюдательных скважинах. Для этого оказывают в возмущающих скважинах внешнее воздействие. Для совершенствования таких методов активно используются методы математического моделирования, численные алгоритмы и программы.

Отличием диссертационного исследования Е.А. Солдатовой является разработка алгоритмов и программного обеспечения, позволяющего проводить обработку информации и системный анализ результатов, получаемых в ходе проведения комплекса вычислительных экспериментов при исследовании стохастических математических моделей. Результатом применения методов системного анализа стало выделение двух групп вычислительных экспериментов при моделировании внешнего воздействия.

В первой группе экспериментов в комплексе программ используется процедура генерации нормально распределенных случайных величин с последующей обработкой результатов серии вычислительных экспериментов. Во второй группе моделируется внешнее воздействие, относящееся к редким событиям. Представленные численные алгоритмы могут быть использованы для исследования математических моделей, параметры которых могут приводить как к вырожденному, так и невырожденному случаю.

Подчеркнем, что большое количество приложений и развитие технологий требует проведения междисциплинарных исследований сложных систем с использованием метода математического моделирования. Для эффективного взаимодействия специалистов различных областей знаний при реализации таких исследовательских проектов полезными являются методы структурного системного анализа. В диссертационной работе реализован метод информационно-логического моделирования, который позволил определить методологию диссертационного исследования на основе построенных структурных связей между различными прикладными задачами, видами математических моделей, методами их аналитического и численного исследований.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа включает в себя введение, три главы, заключение, список литературы и два приложения.

Введение к диссертации включает в себя актуальность избранной темы, степень разработанности избранной темы, цели и задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

Первая глава содержит результаты структурного системного анализа предметной области с применением метода информационно-логического моделирования. В основу положена контекстная диаграмма процесса исследования математической модели. Затем, используя метод уровневой декомпозиции, построены 8 диаграмм, позволившие разработать

методологию исследования неклассических стохастических математических моделей на основе теории относительно ограниченных операторов. Затем, отмечены прикладной характер и особенности исследуемых математических моделей в детерминированном случае. Далее, представлен краткий обзор результатов о разрешимости начальных и начально-конечной задач для линейных уравнений соболевского типа в детерминированном случае, полученных ранее другими авторами. **Во второй главе** содержатся результаты аналитического и численного исследований математической модели Баренблатта – Желтова – Кочиной фильтрации жидкости в трещиновато-пористой среде со случайным внешним воздействием. А именно, доказываемая теорема о разрешимости задачи Коши – Дирихле для стохастического уравнения Баренблатта – Желтова – Кочиной, модифицируются методы Рунге – Кутты – Фёльберга и Галеркина для численного исследования изучаемой стохастической математической модели. Алгоритмы модифицированных численных методов Рунге – Кутты – Фёльберга и Галёркина реализованы в виде программных комплексов, описание которых также приведено в первой главе. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, графические отображения этих результатов. Кроме того, здесь разработан алгоритм обработки информации, получаемой при численном исследовании. Приводятся результаты серии вычислительных экспериментов и графическое отображение результатов их обработки. В третьей главе представлены результаты аналитического и численного исследований стохастических линейных математических моделей с относительно ограниченными операторами на геометрических графах, в том числе модели Осколкова транспортировки нефти по трубопроводу со случайным внешним воздействием и модели Хоффа деформации в конструкции из двутавровых балок со случайным внешним воздействием. Для обеих моделей доказываются теоремы о разрешимости модели с начально-конечным условием и граничными условиями баланса потока и условием непрерывности. Модифицируется проекционный метод Галёркина для численного исследования математических моделей. Обсуждаются общие для обеих моделей аспекты, и особенности численного алгоритма для каждой

из них. Алгоритм численного метода Галеркина реализован в виде программы, описание которой приведено в этой же главе, представлены результаты вычислительных экспериментов на разных графах с различными начальными условиями и их графические отображения. Кроме того, представлен алгоритм программы, позволяющей обработать информацию по исследованию процессов, при моделировании которых используются уравнение Осколкова и Хоффа на графе.

В заключении приведены результаты исследования, даны рекомендации по их применению, намечены перспективы дальнейших исследований.

Библиографический список включает 108 наименований.

Научная новизна

В области системного анализа, управления и обработки информации разработаны алгоритм и программное обеспечение обработки информации для линейных стохастических моделей Баренблатта – Желтова – Кочиной, Осколкова и Хоффа с применением методов информационно-логического моделирования. Представлены результаты обработки информации, полученной при проведении комплекса вычислительных экспериментов.

В области математического моделирования проведено аналитическое исследование стохастических моделей Баренблатта – Желтова – Кочиной с условием Коши, Осколкова с условием Шоуолтера – Сидорова и Хоффа с начально-конечным условием. Найдены условия потраекторной однозначной разрешимости поставленных задач.

В области численных методов предложены алгоритмы численных методов, модифицирующих методы Галёркина, Рунге – Кутты – Фёлберга, позволяющие для исследуемых стохастических неклассических линейных динамических моделей находить приближенные решения (потраекторно).

В области комплексов программ разработан и зарегистрирован комплекс программ для нахождения приближенного решения стохастических неклассических линейных динамических моделей с начальными или начально-конечными условиями. Проведены вычислительные эксперименты

для линейных стохастических моделей Баренблатта – Желтова – Кочиной в области, Осколкова и Хоффа на геометрическом графе.

Степень обоснованности научных результатов и корректность выводов

Достоверность научных результатов и выводов исследования определяется корректным использованием современных математических методов, подтверждена доказательствами в соответствии с современным уровнем математической строгости, согласованностью результатов вычислительных экспериментов с модельными примерами, а также тестированием разработанного программного комплекса на различных математических моделях. Результаты и выводы не противоречат ранее полученным результатам других авторов.

Полученные результаты своевременно опубликованы, апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Диссертация Солдатовой Екатерины Александровны имеет стройную, логически законченную структуру, автореферат соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации соискателем опубликовано 14 научных работ, из них шесть статей - в рецензируемых журналах из Перечня ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в том числе, три статьи – в рецензируемом издании, из наукометрических баз Scopus и Web of Science; одна зарегистрированная программа для ЭВМ и один программный комплекс. В совместных с научными руководителями работах научным руководителям принадлежит постановка задачи, на защиту выносятся только результаты, полученные ее автором и не затрагивают интересы соавторов.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании аналитического метода исследования актуальных стохастических неклассических динамических моделей. Полученные результаты о разрешимости исследуемых задач развивают полугрупповой подход в теории вырожденных стохастических уравнений. Применение абстрактных

результатов для исследования стохастических неклассических динамических моделей, активно используемых в прикладных исследованиях, развивают методы математического моделирования и системного анализа.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в применимости результатов исследования к проблемам гидродинамических исследований, моделирования течения жидкости по системе труб, изучения деформаций в конструкции из двутавровых балок. Это позволяет расширить применимость существующих методов оценки состояний сложных систем, их параметров в задачах гидродинамики, геологии при изучении фильтрации воды в почве, повышения эффективности добычи нефти. Комплексы программ реализованы с использованием разработанных алгоритмов численных методов. Интерфейс программы позволяет встраивать ее в вычислительные среды для решения прикладных задач. Реализованы статичная (графики и трехмерные диаграммы) и динамическая визуализации (трехмерная анимация), позволяющие проводить анализ состояний моделируемых систем.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы могут использовать в теоретических и практических изысканиях Иркутский государственный университет, Волгоградский государственный университет, Воронежский государственный технический университет, Воронежский государственный университет, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Южно-Уральский государственный университет, Юго-Западный государственный университет" (Курск), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Институт проблем управления РАН, Институт математики имени Соболева СО РАН, Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Институт математики и механики УрО РАН и другие учреждения.

Характеристика языка и стиля диссертации

Диссертация написана на профессиональном языке, принимаемые допущения в достаточной мере обоснованы, а логические рассуждения не противоречат правилам формальной логики.

Замечания по диссертации

Положительно характеризуя диссертацию Екатерины Александровны Солдатовой в целом, можно сделать ряд замечаний.

1. В тексте работы при описании вторых групп вычислительных экспериментов автор вводит в употребление словосочетание «редкое событие». Было бы полезно привести формальное определение этого термина, поскольку он имеет неоднозначный смысл.

2. Во второй главе следовало бы отдельно обсудить оценки погрешности метода, полученные по результатам численных экспериментов, учитывая стохастические процессы. Например, сравнивая результаты с какой-либо тестовой задачей.

3. В гл.3 на стр.112 каждое из 6 дифференциальных уравнений является независимым и они не образуют систему. И, во-вторых, коэффициенты перед $\sin$ и $\cos$ различаются примерно на 15 порядков, поэтому возникает вопрос, насколько существенно учитывать в этих уравнениях слагаемые с функцией $\cos$?

4. В тексте работы встречаются стилистические погрешности и орфографические ошибки.

4.1. На странице 49 вводится полное вероятностное пространство $\Omega = (\Omega, A, P)$, в обозначении которого используется символ P , обозначающий вероятностную меру, при этом символ P также используется для обозначения относительно спектрального проектора.

4.2. На страницах 51 и 94 при обозначении единичного оператора используется символ I , что не соответствует условным обозначениям, введенным в начале работы.

Однако, приведенные замечания не уменьшают значимости представленных научных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Солдатовой Екатерины Александровны «Разработка методов и алгоритмов численного исследования неклассических стохастических линейных динамических моделей», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ, системного анализа, управления и обработки информации. Полученные результаты соответствуют научным специальностям 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации. Результаты диссертации являются новыми, строго обоснованными и получены автором самостоятельно. Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в соответствии с пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, поскольку является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи анализа дискретных моделей нелинейной динамики, а ее автор, Солдатова Екатерина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании кафедры математического анализа и теории функций ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (протокол №3 от 22.04.2022).

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором каф. информационных систем и компьютерного моделирования (ИСКМ) Феськовым Сергеем Владимировичем и доктором физико-математических наук, заведующим каф. математического анализа и теории функций (МАТФ) Клячиным Алексеем Александровичем.

Заведующий кафедрой математического анализа и теории функций, доктор физико-математических наук, доцент



А.А. Клячин

Доктор физико-математических наук, профессор каф. информационных систем и компьютерного моделирования



С.В. Феськов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный университет"
400062, Южный федеральный округ, Волгоградская область, г. Волгоград, проспект Университетский, 100. Телефон, факс 8 (8442) 46-02-63, e-mail: ob.otdel@volsu.ru. Сайт: <https://volsu.ru>. Кафедра МАТФ: тел. (8442) 46-02-61, e-mail: matf@volsu.ru; каф. ИСКМ: тел. (8442)47-60-51, e-mail: infomod@volsu.ru

