

## Отзыв

официального оппонента о диссертации Тарасевича В.В.

«Развитие теории и методов расчета гидродинамических процессов в напорных трубопроводных системах», представленной на соискание ученой степени

доктора технических наук по специальности 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология.

**Цель работы** заключается в разработке в достаточной мере общего и универсального подхода к математическому моделированию трубопроводных систем и нестационарных режимов их работы, включающего математические постановки задач, разработку эффективных численных алгоритмов и решение широкого класса практических задач.

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во **Введении** излагаются актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая ценность работы, формулируются задачи и намечаются подходы к их решению.

В **первой главе** диссертации дан обзор работ по нестационарным процессам в сложных напорных трубопроводных (гидравлических) системах. Проведена классификация работ по отраслям применения трубопроводных систем, среди которых водоснабжение, теплоснабжение, атомная энергетика, трубопроводный транспорт, гидропривод. Обсуждаются математические модели и особенности нестационарных режимов течения, среди которых кавитация, сопровождающаяся при схлопывании значительными всплесками давления. Обосновывается применение гипотезы квазистационарности. Выполнен обзор методов расчета гидравлического удара, отмечены положительные свойства явных схем бегущего счета. Поставлен вопрос о разработке упрощенных математических моделей нестационарных течений и методах декомпозиции больших систем.

Во **второй главе** содержится описание области интегрирования математических моделей на языке теории графов, формулируются математические модели движения жидкости в трубах, основанные на одномерных законах сохранения массы, импульса и энергии. Даются представления систем дифференциальных уравнений в характеристической

форме и инвариантах Римана. Построена модель гидравлического удара в системе коаксиальных труб. Показано существование двух пар волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

**В третьей главе** содержится описание математических моделей для наиболее распространенных типов узлов трубопроводной системы. Рассмотрены соединения труб без утечек и с утечками, компенсатор (аккумулятор), уравнильный резервуар, местные сопротивления, насосы и др. Математические модели работы этих элементов применяются для сопряжения решений по примыкающим трубопроводам и с граничными условиями. Обсуждаются требования корректности условий сопряжения. Предложена систематизация математических моделей разнородных элементов сопряжения на основе объектно - ориентированного подхода, позволяющая выстроить технологическую цепочку «объект исследования – математическая модель – методика расчета – разработка программного обеспечения». Последнее существенно облегчает процесс разработки программной реализации математической модели трубопроводной системы.

**Четвертая глава** посвящена математическому моделированию процесса возникновения кавитации (или разрыва сплошности потока) при гидравлическом ударе. Разрыв сплошности потока проявляется в формировании в потоке полостей (каверн), мелких пузырьков и пузырей значительного размера при существенном понижении давления. Схлопывание неоднородностей может сопровождаться существенным повышением давления, которое может привести к разрушению трубопровода и оборудования гидравлической системы. В результате проведенных исследований получено аналитическое решение задачи о гидравлическом ударе в простом трубопроводе (при пренебрежении трением), сопровождающемся разрывом сплошности потока. Установлено явление вторичной кавитации и предложены формулы для определения местоположения и момента возникновения вторичных каверн. При учете трения получена приближенная формула оценки максимального напора (давления) после схлопывания каверны, обобщающая известную формулу Н.Е. Жуковского.

**В Пятой главе** строятся оригинальные численные реализации математических моделей. Анализируются свойства явной и неявной схем бегущего счета и вопросы их применения в изучаемых классах задач.



Предложена комбинированная явно-неявная вычислительная схема, использующая преимущества обоих подходов. Продемонстрированы ее преимущества на примере расчета сложной системы технологических трубопроводов АЭС большой размерности. Такой подход позволяет на «длинных» трубах проводить расчеты явным методом, на «коротких» – неявным, сложным в реализации. Предложен модифицированный алгоритм расчета в случае появления разрыва сплошности. Построена модифицированная явная схема бегущего счета для случая коаксиальных трубопроводов. Представлены содержательные примеры расчетов.

В **шестой главе** детально исследуются вопросы построения упрощенных математических моделей нестационарных режимов работы трубопроводов сложной сетевой структуры с целью повышения быстродействия расчетов. Автор предлагает два подхода. Первый из них состоит в сведении моделей с распределенными параметрами к моделям с сосредоточенными параметрами. Второй подход состоит в эквивалентировании расчетных схем трубопроводных систем в условиях их описания моделями с сосредоточенными параметрами. Сформулированы три варианта моделей с сосредоточенными параметрами. Проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие работоспособность моделей и результаты их сопоставления. Результаты расчетов сопоставлены также с эталонными моделями гидроудара. Оценены области применимости этих моделей в зависимости от параметров исследуемых задач. Одной из упрощенных математических моделей, построенных в диссертации, является система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, позволяющая дать удовлетворительное описание работы широкого класса трубопроводных систем.

**Седьмая глава** посвящена имитационному моделированию работы трубопроводной системы на примере систем автоматического регулирования. При этом системы автоматического регулирования входят в качестве отдельных подсистем. В итоге предложен испытательный математический стенд, позволяющий поэлементно тестировать сложную трубопроводную систему. С помощью стенда можно оценивать время реакции различных управляющих и регулирующих устройств на возникающие возмущения. Рассмотренный подход опирается на трактовку входящих и выходящих инвариантов Римана как входящих и выходящих сигналов.



Таково краткое содержание диссертации и перечень ее основных результатов.

**Актуальность темы диссертации.** Актуальность и важность тематики исследований диссертационной работы обусловлена чрезвычайной распространенностью и разнообразием напорных систем (водопроводные и тепловые сети, магистральные трубопроводы различного назначения, гидроприводы машин и механизмов, системы подачи топлива и нефтепроводы, кровеносная система высокоорганизованных живых организмов и др.).

Все эти объекты объединяет наличие сложной разветвленной и/или закольцованной области определения в виде одномерного комплекса (графа). Это обстоятельство налагает дополнительные, весьма специфические требования на методику численных расчётов процессов в таких системах и значительно осложняет решение.

Для достоверного проектирования гидравлической системы и её надежного функционирования необходимо знание не только статических, но и динамических характеристик процесса для всего диапазона штатных и нештатных (в том числе и аварийных) ситуаций. Комплекс программ расчёта на ЭВМ является в данном случае основным инструментом исследований, что требует разработки экономичных и достаточно универсальных методик расчёта.

Требуют своего решения также теоретические вопросы, такие, как гидравлический удар, сопровождающийся разрывом сплошности потока, нестационарные течения в специальных областях (например, коаксиальных трубопроводах) и др.

Их рассмотрению посвящена рассматриваемая диссертация.

Основные результаты, защищаемые положения и выводы работы являются **новыми**. Впервые аналитически исследован процесс разрыва сплошности потока на примере гидравлического удара в простом наклонном трубопроводе. Выявлена возможность образования каверны не только у задвижки, но и в средней части потока, при развитии вторичной кавитации. Разработана оригинальная модель гидравлического удара в коаксиальных трубопроводах. Построена явно-неявная конечноразностная схема расчета нестационарных режимов в трубопроводных системах сетевой структуры, адаптированная к особенностям течения на «длинных» и «коротких» трубах, являющихся элементами трубопровода. Предложен оригинальный подход к



описанию трубопроводных систем моделями с сосредоточенными параметрами с понижением их размерности путем эквивалентирования, что позволило существенно упростить расчет больших систем. Построен оригинальный математический стенд, позволяющий проводить имитационное моделирование отдельных частей и элементов трубопроводных систем в нестационарном режиме без расчетов остальной части трубопровода.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов, выводов и выносимых на защиту положений обеспечиваются глубокой проработкой научной литературы, корректностью физико-математического описания, детальными численными экспериментами, сопоставлением результатов работы с известными теоретическими и экспериментальными результатами.

**Практическая значимость и рекомендации по использованию.** Теоретическая значимость заключается прежде всего в систематизации и обобщении известных математических моделей работы сложных трубопроводных систем и построении эффективных методов их расчета. Работа вносит существенный вклад в теорию гидравлических цепей и методов их расчета. Разработанные в диссертации математические модели, включающие постановки задач, численные алгоритмы их решения и программные реализации применялись и могут применяться к расчету нестационарных режимов трубопроводных систем как на стадии их эксплуатации, так и проектирования. Имеются справки о плодотворном применении результатов диссертационной работы на ряде предприятий и в высших учебных заведениях.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, входящих в Перечень ВАК. Результаты диссертационной работы докладывались на ведущих отечественных и международных конференциях и научных семинарах.

По диссертационной работе В.В. Тарасевича нет замечаний принципиального характера, которые могли бы поставить под сомнение общую положительную оценку диссертации как квалификационной работы.

В качестве замечаний можно отметить следующие.

1. Существенное место в диссертационной работе занимают вопросы, связанные с построением численных алгоритмов и их компьютерных реализаций. К сожалению, в диссертации отсутствует обсуждение порядка сходимости (точности) численных моделей.

Работа изобилует примерами расчетов, однако отсутствует обсуждение вопроса о реальной точности расчетов. Было бы целесообразным дать реальные практические оценки точности расчетов путем проведения расчетов содержательной задачи (задач) на последовательности сеток.

2. Отсутствуют данные о языках программирования и компьютерных ресурсах, необходимых для проведения расчетов с применением разработанных комплексов программ.
3. Отсутствуют описание результатов численных экспериментов, демонстрирующих результаты имитационного моделирования (стр.196—199).

Следует отметить некоторое количество погрешностей оформления.

В частности:

1. На стр. 27 диссертации (и стр. 9 автореферата) утверждается: «Обосновано применение гипотезы квазистационарности, согласно которой потери на трение при нестационарном режиме подчиняются тем же зависимостям, что и при нестационарном». В конце предложения слово «нестационарном», по-видимому, следует заменить на «стационарном».

2. На стр. 16 диссертации утверждается, что основные результаты диссертации опубликованы в более чем 40 печатных работах. А на стр. 7 автореферата отмечается, что основные результаты диссертации опубликованы в 110 печатных работах.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы Тарасевича В.В. Автореферат диссертации адекватно передает ее основные результаты.

Научные положения, выводы и предложения диссертации хорошо аргументированы, достаточно полно проработаны и обоснованы, тема диссертации полно раскрыта в опубликованных статьях; личный вклад соискателя в работу несомненен.

Диссертационная работа Тарасевича В.В. «Развитие теории и методов расчета гидродинамических процессов в напорных трубопроводных системах» представляет собой целостное, непротиворечивое, полное и оригинальное исследование, в которой автором разработаны теоретические основы, методы и алгоритмы изучаемого класса задач, имеющие важное хозяйственное значение. Диссертационное исследование можно квалифицировать как



законченную научно-исследовательскую работу, которая вносит основополагающий вклад в перспективное направление, связанное с математическим моделированием гидродинамических процессов в напорных трубопроводных системах.

В связи с вышеизложенным считаю, что диссертационная работа «Развитие теории и методов расчета гидродинамических процессов в напорных трубопроводных системах» отвечает критериям, установленным в п.п. 9-11, 13-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г., а соискатель, Тарасевич Владимир Владимирович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология.

гл. научн. сотр.

д.ф.-м.н. профессор

24 ноября 2017 года

/Г.Г. Черных/

Служебный адрес: 630090 Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 6

Тел.(сл): 8(383) 3-308-570, e-mail:chernykh@ict.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт вычислительных технологий Сибирского отделения

Российской академии наук, лаборатория математического моделирования

Подпись главного научного сотрудника Института вычислительных технологий СО РАН доктора физико-математических наук профессора Черных Геннадия Георгиевича удостоверяю

Ученый секретарь ИВТ СО РАН

к.ф.-м.н.

24 ноября 2017 года



/А.А. Редюк/