

ОТЗЫВ

официального оппонента Смирнова Николая Николаевича
на диссертационную работу Чионова Антона Михайловича
«Инструменты компьютерного моделирования термогидродинамических режимов потока
в многослойно изолированных подводных газопроводах высокого давления»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, пяти приложений и библиографического списка из 96 наименований. Работа изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 3 таблицы и 84 рисунка.

Актуальность темы диссертации

В связи с продолжающимся развитием систем магистрального транспорта природного газа, в том числе по наземным и современным морским газопроводам с высоким давлением, возрастает актуальность совершенствования методов моделирования технологических параметров (давления, температуры и расхода). Диссертация направлена на разработку термогидродинамических моделей газопроводов, алгоритмов и комплекса программ термогидродинамического расчета подводных многослойно изолированных газопроводов высокого давления (30МПа и выше) с учетом теплообмена с окружающей средой.

К сложным современным газопроводам высокого давления предъявляются повышенные требования к безопасности и надежности их функционирования, для обеспечения которых необходимо постоянно осуществлять контроль параметров потока газа с целью выполнения соответствующих технологических и физических ограничений. Для подводных газопроводов высокого давления одними из основных ограничений является максимальное и минимальное давление в трубе, а также минимальная температура газа. Причем, так как газопровод находится под водой, ограничение по минимальному значению температуры газа обуславливается не только прочностными характеристиками трубы, но и температурой обмерзания, при которой на внешней поверхности газопровода могут образовываться наледи, что может привести к изменению механических нагрузок на трубопровод из-за движения грунта или изменения выталкивающей силы.

В условиях ограниченности экспериментальных данных о параметрах потока в газопроводе и его температурном режиме работы особую важность приобретает задача разработки адекватной математической модели газопровода. При выполнении инженерно-

технических расчетов газопроводов традиционно используют нормативные документы, такие как «Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов», которые могут применяться для расчетов газопроводов с давлениями не выше 16 МПа.

В настоящее время для расчетов термогидродинамических режимов газопроводов применяют различные коммерческие программные комплексы (ПК), такие как ПК «Simone» (разработчик SIMONE Research Group, s.r.o.), ПК «OLGA» (SPT Group, Норвегия) и другие. При этом, как правило, имеющиеся коммерческие ПК не обладают необходимой гибкостью и открытостью используемых гидродинамических моделей газопроводов. Так, например, программный комплекс «OLGA» использует для расчета гидравлических потерь только формулу Хааланда, и не позволяет гибко изменять вид уравнения расчета гидравлического сопротивления. Как показали расчеты газопровода «Голубой поток», использование этой модели гидравлического сопротивления не позволяет адекватно моделировать как стационарные, так и нестационарные гидродинамические режимы. Для ПК «Simone» до недавнего времени ограничение на максимально возможное давление составляло 20 МПа, в то время как уже существуют газопроводы, где рабочие давления поднимаются выше. В связи с этим задача разработки термогидродинамической модели и ПК приобретает дополнительную актуальность, в том числе и с точки зрения проблем импортозамещения.

Первая глава работы посвящена научному обзору исследований по моделированию течения газа в трубопроводах. Дан обзор уравнений состояния для расчета термодинамических свойств природного газа. Далее приведен краткий обзор научных исследований в области газовой динамики, обзор моделей гидравлических сопротивлений. Приведен краткий обзор методов расчета теплообмена современных газопроводов с окружающей средой. Так же дан краткий обзор существующих на рынке программных комплексов для моделирования газопроводов.

Вторая глава посвящена разработке термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур. Производится построение общей системы уравнений в частных производных, уравнений связи и начальных и граничных условий. Осуществляется построение алгоритма численного решения полученной системы уравнений. Описаны алгоритмы преобразования информационно разреженных матриц систем линейных уравнений к упорядоченному блочно-ленточному виду. После проведенного анализа построенных решений автору удается упростить модель, выделив в уравнении баланса энергии в явном виде член, отвечающий за тепловую инерцию массивной стенки трубопровода.

В третьей главе работы описывается программная реализация разработанных автором термогидродинамических моделей газопроводов, алгоритмов и комплекса программ термогидродинамического расчета подводных многослойно изолированных газопроводов высокого давления (30МПа и выше) с учетом теплообмена с окружающей средой в среде Microsoft Visual Studio и с использованием современных средств и методов программирования на языке C++. Приведены результаты Приведены результаты вычислительных экспериментов по проверке сходимости алгоритмов решения уравнений газовой динамики и теплопроводности.

В четвертой главе диссертации проведена проверка адекватности построенной термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур.

Приведены результаты вычислительных экспериментов для модельного газопровода. Представлены результаты сравнительного анализа традиционного алгоритма расчета теплообмена потока газа с окружающей средой, с помощью общего коэффициента теплопередачи, и алгоритма, разработанного в диссертации. Рассчитывается величина поправки температуры газа, обусловленной уточнением модели окружающей среды как при стационарных, так и при нестационарных режимах работы газопровода.

Описаны технологические постановки задач, возникающие при выработке научно-обоснованных рекомендаций по анализу возникновения возможных нештатных ситуаций при эксплуатации газопроводов высокого давления

Научная новизна

Новизна полученных диссидентом результатов и их научная ценность заключается в том, что впервые получены модели и методы, позволяющие вести расчет параметров потока в линейной части газопровода, применительно к современным магистральным морским газопроводам при высоких давлениях (до 36 МПа) с учетом нестационарных теплообменных процессов, протекающих в материале многослойно изолированной стенки трубопровода при неизотермическом неустановившемся режиме их работы.

Автором впервые введена поправка в уравнение баланса энергии потока газа в трубопроводе, характеризующая тепловую инерцию массивной стенки трубопровода при нестационарных режимах течения. Поправка получена в результате построения автором приближенного аналитического решения уравнения теплопроводности в многослойно изолированной стенке трубопровода. Вид поправки, перенесенной в левую часть уравнения энергии, позволяет привести его к виду используемых повсеместно уравнений

с потерями, в которых добавлена «присоединенная теплоемкость газа» и уточнены коэффициенты теплообмена с окружающей средой.

Практическая значимость

Разработанная термогидродинамическая модель однофазного потока газа в газопроводе успешно использована для инженерно-технических расчетов различных режимов работы газопроводов высокого давления «Голубой поток» и «Северный поток».

Разработанная упрощенная термогидродинамическая модель позволяет в режиме реального времени с повышенной точностью по сравнению с традиционными моделями, не учитывающими тепловую инерцию стенки трубопровода, рассчитывать распределения параметров потока в современных газопроводах высокого давления, в том числе для неустановившихся режимов работы при возникновении непривычных ситуаций.

Разработанная модель газопровода может быть адаптирована к расчету реальных объектов и использована в автоматизированных системах управления

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов обеспечена строгостью используемого математического аппарата и подтверждается хорошим совпадением результатов многочисленных вычислительных и натурных экспериментов.

Сформулированные в работе технологические и физические допущения обоснованы как в результате их смыслового теоретического анализа, так и применением методов математического моделирования и вычислительной математики. Результаты диссертационной работы не противоречат ранее полученным известным результатам других авторов.

Замечания

К недостаткам работы следует отнести следующее.

1. В работе не отражен анализ возможности использования параллельных вычислений.
2. При построении численного решения системы уравнений газовой динамики автор успешно использует полностью неявную по времени разностную схему первого порядка. Возможно, использование явной разностной схемы при использовании параллельных вычислений позволит увеличить скорость построения решения. Это вопрос не затронут в диссертационной работе.

Оценка работы

Анализ представленной к защите диссертации А.М. Чионова позволяет сделать вывод о высоком профессиональном уровне автора, его умении применять аппарат физико-математического моделирования и численных методов, а также анализировать получаемые результаты и выявлять характерные закономерности, что позволило ему решить все поставленные научные задачи. Изложение материала в диссертации ясное, четкое, с необходимым уровнем математической формализации и достаточным набором иллюстративного материала в виде блок-схем, рисунков, и таблиц. Работа написана хорошим научно-техническим языком.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Диссертационная работа Чионова А.М. отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверженного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а ее автор Чионов Антон Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Доктор физико-математических наук,
профессор механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
зам. зав. кафедрой газовой и волновой динамики

Н.Н. Смирнов

Подпись профессора Смирнова Н.Н. удостоверяю
Декан механико-математического ф-та МГУ, профессор



Б.Н. Чубариков