

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе Молева Сергея Сергеевича
“Численное исследование эффекта повышения скорости
самоподдерживающейся детонации при распространении по каналу с
пограничными слоями”, представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) –
“Механика жидкости, газа и плазмы”

Диссертация С.С.Молева выполнена в Лаборатории физического и численного моделирования течений с горением, которая входит в Отдел вычислительной аэродинамики Отделения аэродинамики силовых установок Федерального государственного унитарного предприятия “Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского” (ФГУП “ЦАГИ”). Начиная с прохождения дипломной практики (во время учебы в МФТИ), С.С.Молев занимался в Отделе вычислительной аэродинамики проблемами численного моделирования нестационарных течений: исследованием численных методов расчета нестационарных течений, их реализацией в компьютерных программах и применением к решению различных физических задач. Весь этот опыт реализован им в настоящей диссертации.

Диссертация посвящена анализу взаимодействия детонационной волны с пограничными слоями при движении волны в канале против потока. Для анализа используются средства численного моделирования. **Рассматриваемая проблема является одной из нерешенных проблем газовой динамики детонационных волн.** Главный вопрос – физический механизм, который приводит к распространению самоподдерживающейся детонации со скоростью, на несколько сотен метров в секунду превышающей скорость классической одномерной детонации Чепмена-Жуге. Этот эффект был обнаружен экспериментально в 1970 году. С тех пор было поставлено лишь два эксперимента, которые подтвердили существование данного эффекта. Удовлетворительное объяснение этого эффекта до сих пор не было найдено. Поэтому **решение этой проблемы, найденное в диссертации, имеет важное значение для развития газовой динамики волн горения.**

Актуальность исследования определяется, с одной стороны, широким кругом возможных практических приложений детонаций – от применений в энергетических установках разных типов до обеспечения взрывобезопасности на производстве. Известны применения детонации в медицине, при штамповке металлических изделий, для эффективной переработки пластиковых отходов и многие другие. Заранее невозможно предсказать, где могут пригодиться знания о газовой динамике детонационных волн, поэтому исследовать эту газовую динамику необходимо. И Отделение аэродинамики силовых установок ЦАГИ, деятельность которого существенно связана с решением задач газовой динамики, может применить свой научный потенциал и для решения данных проблем. С другой стороны, детонация является

замечательной основой для развития технологий численного моделирования течений с горением в силовых установках летательных аппаратов. В задачах с детонационными волнами возникают те же физические эффекты, что и в тракте силовых установок ВРД (скачки уплотнения, волны разрежения, области неравновесного горения, слои смешения, пограничные слои, рециркуляционные зоны, теплообмен на стенках канала). Но обычные ВРД представляют собой системы с длинной обратной связью, в которых установлением рабочего режима связано с длительным процессом передачи возмущений от сопла к воздухозаборнику и обратно. А в задачах с детонацией, как правило, процесс развивается намного быстрее. Поэтому параметрические исследования, связанные с сопоставлением различных вариантов численного метода, удобно проводить на тестовых задачах с детонационными волнами. Автор настоящего отзыва в течение многих лет занимался параллельно численными исследованиями детонационных волн и численными решением практических задач Отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ, и численные технологии, развитые в процессе решения задач о детонационных волнах, успешно использовались для решения практических задач. Яркий пример такого использования детонации приведен в разделе 2.6 диссертации С.С.Молева и привел автора диссертации к существенному результату, вынесенному им на защиту.

Работа сделана как преимущественно монотематическая, сконцентрированная на решении одной задачи.

Первые две главы диссертации небольшие. В первой главе дан обзор классической теории детонации, основных практических приложений детонации и экспериментов по распространению детонации в каналах. Наибольшее внимание уделено экспериментам по распространению детонации в каналах с пограничными слоями, в которых наблюдалось увеличение скорости детонации по сравнению со скоростью волны Чепмена-Жуге. Вторая глава описывает математическую постановку задачи. Выписаны уравнения, сформулированы основные граничные условия, рассмотрены численные методы, реализованные в компьютерной программе при существенном участии автора. Дан список базовых тестов. Основной акцент делается на пригодности численных методов для моделирования нестационарных течений с пограничными слоями и горением и на сопоставлении их вычислительной эффективности.

Основную часть диссертации занимает третья глава, посвященная всестороннему численному исследованию распространения детонации вверх по течению в канале с пограничными слоями. В столь сложном течении, с взаимодействием многих физических эффектов, заведомо невозможно вполне воспроизвести эксперимент в расчете. Поэтому для обеспечения **достоверности** выводов задача решается разными способами, и полученные решения сопоставляются друг с другом. Сначала находятся характеристики классической детонации Чепмена-Жуге. Для этого рассмотрено три подхода (нульмерный, одномерный и двумерный с условием скольжения на стенках канала). Затем на базе нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS),

замкнутых моделью SST, моделируется классический эксперимент 1970 года. Рассматриваются два основных подхода: расчеты на равномерной сетке с граничным условием “закон стенки” и расчеты на неравномерной сетке с граничным условием прилипания. Сопоставляются двумерные и трехмерные расчеты, а также расчеты на основе метода моделирования крупных вихрей (LES), выполненные А.И.Трошиным. **Близость результатов URANS- и LES-расчетов доказывает применимость модели турбулентности SST в данном классе задач. В трехмерном случае достигнуто хорошее согласование с экспериментом по скорости детонации. Найден и обоснован физический механизм, объясняющий увеличение скорости детонации. Для его доказательства выполнен численный эксперимент, в котором этот физический механизм устранен. Исследовано влияние различных физических эффектов на скорость детонации в канале и на структуру течения.**

Идея данного исследования была предложена руководителем Лаборатории физического и численного моделирования течений с горением, известным ученым в области турбулентного горения профессором В.А.Сабельниковым. Сотрудники Лаборатории участвовали в обсуждении результатов исследования и оказывали С.С.Молеву посильную помощь. Однако **личный вклад С.С.Молева** в осуществление задач данного исследования – **очень существенный**. Результаты С.С.Молева по исследованию методов моделирования нестационарных процессов (прежде всего, дробного шага по времени) помогли Лаборатории осуществить выбор наиболее оптимальных подходов. **С.С.Молев является одним из ключевых разработчиков компьютерной программы zFlare**, в которой реализованы выбранные численные методы. **Все расчеты на базе уравнений Рейнольдса выполнены и обработаны автором лично**. Причем в диссертации представлена лишь небольшая часть наиболее значимых расчетов. Автором было перепробовано множество вариантов с различной постановкой задачи, и эти численные эксперименты позволили разобраться с крайне непростой физикой задачи. **Идеи ряда численных экспериментов были предложены С.С.Молевым**, другие предлагали В.А.Сабельников и научный руководитель работы. С.С.Молев **предложил простую квазиодномерную теорию**, которая согласуется с результатами расчетов, и показал, что два способа определения скорости волны, которые можно предложить в рамках этой теории, не противоречат друг другу.

Основные результаты моделирования эксперимента 1970 года были представлены на Международном коллоквиуме по непрерывной и импульсной детонации (ICPCD-2020), где вызвали большой интерес участников конференции, среди которых присутствовали такие общепризнанные авторитеты в исследованиях детонации, как С.М.Фролов (ФИЦ ХФ им. Н.Н.Семенова РАН) и Ф.А.Быковский (Институт гидродинамики им.М.А.Лаврентьева СО РАН). Их замечания и советы помогли улучшить работу. На ежегодной конференции Отдела горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН (COMBEX-2021) доклад С.С.Молева получил премию

как одна из лучших работ, представленных на конференции. По теме диссертации С.С.Молевым опубликовано 7 работ в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертация С.С.Молева соответствует паспорту специальности 1.1.9 (01.02.05) – “Механика жидкости, газа и плазмы”, поскольку в ней на основе идей и подходов механики сплошной среды изучаются процессы и явления, сопровождающие турбулентные течения газа с выделением тепла за счет химических реакций, включая ударные и детонационные волны, пограничные слои и слои смешения.

По мнению научного руководителя, диссертация Молева Сергея Сергеевича – цельное, монотематическое и законченное исследование, которое доказывает научную квалификацию автора и имеет важное значение для газовой динамики волн горения. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05)– “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Научный руководитель, *Владимир Викторович Власенко*
зам. нач. лаборатории №14
отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ
д.ф.-м.н., доцент
140180, Мос. обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
+7-916-660-71-27, e-mail: vlasenko.vv@yandex.ru

В.В.Власенко
В.В.Власенко

Подпись Власенко В.В. заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ
31.1.006.01 (Д 403.004.01)
д.ф.-м.н., доцент



М.А. Брутян
М.А. Брутян