

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе Сергея Бахнэ «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES»,
представленной к защите на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

В работе Сергея Бахнэ с применением методов вихреразрешающего численного моделирования решена задача, имеющая важное значение для развития газовой динамики турбулентных течений с горением и для практических приложений – задача о горении при поперечной инжекции топлива в сверхзвуковой поток в канале прямоугольного сечения.

Решенная задача является весьма актуальной. Исследование высокоскоростных течений с горением невозможно без использования численных расчетов. Хотя в последнее время при помощи вихреразрешающих подходов достигнуты значительные успехи в описании различных классов течений, достижения в области численного моделирования течений с горением являются гораздо более скромными. Особенно это относится к высокоскоростным течениям и к течениям в каналах, где приходится использовать гибридные подходы с переходом к уравнениям Рейнольдса (RANS) в окрестности стенок. Учитывая огромные затраты на вихреразрешающие расчеты по сравнению с RANS-подходом, актуальным является вопрос о научной и практической пользе вихреразрешающих расчетов в этом классе задач. На этот вопрос пытается ответить Сергей Бахнэ в своей диссертации.

Для этого Сергей Бахнэ выбрал из нескольких современных численных схем одну наиболее подходящую для вихреразрешающих расчетов течений в каналах, реализовал её в программе, откалибровал константы подсеточной модели, протестировал выбранный вихреразрешающий метод на ряде тестов, воспроизводящих различные элементы целевой задачи, и, наконец, применил к моделированию одного режима эксперимента ONERA. Помимо нескольких серий подготовительных расчетов, автором выполнены два вихреразрешающих расчета турбулентного течения с многостадийной кинетикой горения водорода в экспериментальной модели ONERA с шероховатыми стенками, вдувом топлива со стенок и оптическими окнами. Расчеты проводились на сетках мощностью порядка 100 млн ячеек с воспроизведением интервала времени порядка 0.01 сек. Использовался суперкомпьютер РФЯЦ ВНИИЭФ. Расчеты горения такой мощности являются уникальными в России и находятся на мировом уровне.

Хотя диссертация содержит много новых результатов, касающихся методологии выбора численной схемы для вихреразрешающих расчетов, калибровки констант подсеточной модели турбулентности, формулировки численных граничных условий, наиболее существенными новыми научными результатами являются установленные автором физические факторы, имеющие определяющее влияние на структуру течения с горением в канале, и физический механизм стабилизации горения, выявленный в проведенных расчетах.

Стоит остановиться на аргументах в пользу достоверности полученных результатов. Автор не претендует на вполне адекватное воспроизведение картины течения, наблюдаемой в экспериментах ONERA. Впрочем, во второй серии расчетов получена картина, похожая на то, что было зарегистрировано в эксперименте ONERA оптическими методами – стабилизация горения в области частичного запираания канала при небольших продольных колебаниях зоны горения. С инженерной точки зрения, согласие полученных распределений давления с экспериментом – вполне удовлетворительное. Однако горение

стабилизируется в расчете немного выше по потоку, чем в эксперименте, и ясно, что во второй серии расчетов учтены не все физические факторы. Но специфика данного класса задач (высокоскоростные турбулентные течения с горением в каналах) заключается в том, что достичь идеального согласия с экспериментом практически невозможно. Достаточно сказать, что в данной задаче существенную роль играет отвод тепла через стенки канала. При этом стенки нагреваются в процессе эксперимента; а измерить температуру стенок экспериментаторам не удалось. Поэтому к полученным в диссертации результатам необходимо относиться как к результатам, физически обоснованным в рамках физико-математической модели течения, которая использовалась в расчетах. Если воспроизвести в природе условия этой модели, то установленные в диссертации физические эффекты повторятся. Уверенность в этом основана на выполненном Сергеем Бахнэ тестировании численного метода и программы, которое включало: воспроизведение спектра изотропной турбулентности; описание слоя смешения; расчет пограничного слоя на гладкой и шероховатой пластинах; моделирование течения с отрывом турбулентного пограничного слоя из-под падающего скачка уплотнения; наконец, моделирование горения водорода, инжестируемого в поперечный сверхзвуковой поток воздуха (эксперимент Бен-Якар). По всем этим задачам получено хорошее согласование с экспериментальными данными и данными эталонных расчетов других авторов. Поэтому можно быть уверенным в **достоверности полученных физических результатов**.

Важно подчеркнуть особенность выбранного эксперимента – устойчивое горение в высокоскоростном потоке в канале с выдувом поперечной струи топлива при отсутствии специальных механических устройств для стабилизации горения. **Теоретическое значение для газовой динамики течений с горением** имеет определение физических факторов, которые существенно влияют на структуру таких течений (шероховатость стенок, теплообмен на стенках канала и продольные вихри, формирующиеся в углах канала), а также установленный механизм стабилизации горения, основанный на частичном запираании канала и включающий продольные колебания структуры течения. Подобные колебания были и в эксперименте; важно отметить, что их удалось воспроизвести в вихреразрешающих расчетах, но в выполненных автором RANS-расчетах они не получались. **Важное методическое значение** имеет предложенная автором методика выбора численной схемы для вихреразрешающих расчетов и демонстрация важности воспроизведения пульсаций в набегающем пограничном слое. **Практическая значимость** выполненной работы состоит в том, что выбранный численный метод реализован в программе zFlare и используется в расчетных исследованиях ЦАГИ.

Работа была подготовлена Сергеем Бахнэ на базе Лаборатории физико-математического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением ЦАГИ в ходе обучения в очной аспирантуре МФТИ. Автор является сотрудником Лаборатории с 2019 г., когда он еще учился в МФТИ. Он успешно окончил аспирантуру МФТИ в 2023 г. К этому моменту основные расчеты, описанные в диссертации, были закончены. Однако активное участие автора в научно-исследовательских проектах Лаборатории (включая два гранта РФФИ) привело к тому, что завершить диссертацию он смог лишь к 2025 году.

Аспирант зарекомендовал себя как серьезный, вдумчивый исследователь, отлично владеющий методами математического анализа и вычислительной математики, глубоко разбирающийся в газовой динамике турбулентности и горения, принципиальный, критически относящийся к результатам своих исследований. Он проанализировал огромный объем литературы и сделал выводы, которые помогли ему в исследовании. Результаты работы С.Бахнэ обсуждались на семинарах Лаборатории с участием мирового авторитета в области турбулентного горения, проф. В.А.Сабельникова, докладывались на многих отраслевых и международных конференциях, опубликованы в высокорейтинговых

рецензируемых журналах. Имя С.Бахнэ хорошо известно в отечественном научном мире среди вычислителей, занимающихся вихреразрешающими расчетами. Он также является старшим преподавателем кафедры компьютерного моделирования МФТИ, читает лекции курсу курс "Низкодиссипативные методы решения уравнений газовой динамики" и ведет семинары по курсу "Прикладная газовая динамика". Сергей является победителем научно-технического конкурса «Будущее ЦАГИ-2022» в номинации «Лучшее научное исследование», а также лауреатом премии им. Н.Е. Жуковского за выдающееся учебное пособие по авиационным дисциплинам за 2023 год. Он опубликовал 14 научных статей, входящих в WoS/Scopus или ВАК. Является автором четырех ноу-хау. Диссертант полностью сформировался как самостоятельный исследователь.

Диссертационная работа Сергея Бахнэ «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES» является цельным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, и имеет как теоретическую, так и практическую ценность. Она полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор С.Бахнэ заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Научный руководитель

заместитель начальника Лаборатории №14

Отделения аэродинамики силовых установок ФАУ «ЦАГИ»

(адрес организации: 140180, Московская область,
г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1),

д.ф.-м.н., доцент

“01” июля 2025 г.

Владимир Викторович Власенко

Шифр специальности, по которой защищена диссертация составителем отзыва:
01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы (диплом выдан в 2018 г.)

Подпись научного руководителя В.В. Власенко заверяю:

Заместитель начальника управления персоналом ФАУ «ЦАГИ» –
начальник отдела кадров



О.А. Шабурова