

УДК 53.08;535.8:004.932;662.61;533.6.011

КОМПЛЕКСНАЯ ПАНОРАМНАЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

Д. В. Безруков, В. В. Власенко, А. Н. Морозов, А. Ю. Ноздрачев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, 140180 Жуковский,
vlasenko.vv@yandex.ru

Приведены результаты применения разработанной многоканальной панорамной системы визуализации потока с горением в модельном канале на экспериментальном стенде. Основной акцент сделан на принципах работы компонентов системы визуализации, особенностях их выбора, требованиях к системе и параметрам ее компонентов. Отмечены достоинства и недостатки разработанной многоканальной системы визуализации. Представлены возможные способы модернизации ее компонентов с целью более точного описания процессов горения.

Ключевые слова: панорамная визуализация, мультиспектральная визуализация, обработка изображений, хемилюминесценция, модель турбулентного горения, модель химической кинетики.

DOI 10.15372/FGV2024.9459
EDN MPCZDP

ВВЕДЕНИЕ

Разработанные новые математические модели сложных течений и основанные на них компьютерные программы могут применяться на практике только после их экспериментальной валидации (т. е. после сопоставления результатов расчета реальных течений с детальными экспериментальными данными), которая позволяет оценить точность и надежность новых моделей и программ, установить границы их применимости.

В связи с этим особенно актуальной является подготовка баз экспериментальных данных, специально предназначенных для валидации математических моделей и основанных на них компьютерных программ. Это подразумевает особые требования к эксперименту — детальное измерение разнообразных физических параметров, позволяющее корректно поставить начальные и граничные условия в расчете, визуализация физической картины течения, получение полей определяющих физических параметров в потоке, сопоставление данных измерения одних и тех же величин различными методами. Предпочтительными являются бесконтактные оптические измерения, не исказжающие структуру течения.

Объем данных по горению в потоке достаточно ограничен. Имеется сравнительно небольшое число классических экспериментов

с предельно упрощенной постановкой задачи. К сожалению, попытки моделирования этих экспериментов обнаруживают существенные недостатки и нехватку информации в опубликованных данных [1]. Значительное число экспериментов было посвящено исследованию течения в модельных энергетических установках. Несмотря на высокое качество многих работ, сложная геометрия экспериментальной модели, использование сложных устройств для инжекции топлива и стабилизации горения (пилоны сложной формы, ступеньки, каверны и пр.) приводят к взаимодействию большого числа разномасштабных эффектов, затрудняющих валидацию математических моделей горения.

В ЦАГИ были выполнены аэродинамические эксперименты на стенде для получения новых экспериментальных данных по течениям с горением в каналах. Разработана экспериментальная модель с упрощенной геометрией и возможностью применения комплексной панорамной мультиспектральной системы для визуализации горения.

Основным параметром визуализации является пространственное распределение свечения хемилюминесценции в различных спектральных диапазонах — от ближнего ультрафиолета (УФ) до ближнего инфракрасного (ИК). Исследование пространственного свечения дает информацию о тепловыделении, полноте сгорания и температуре потока с горением.

Цель работы — апробация разработанной комплексной мультиспектральной панорамной системы визуализации потоков с горением, а также постановка валидационных экспериментальных исследований на стенде для моделирования горения с целью дальнейшего сравнения результатов эксперимента и компьютерного расчета.

Под комплексной визуализацией следует понимать регистрацию, обработку и представление пространственных данных сложного в плане наблюдения и восприятия физического процесса. Комплексный подход заключается в описании потока с горением совокупностью основных характеристик: поле тепловыделения, поле температуры, поле локальной относительной полноты сгорания.

Панорамная визуализация физических полей включает в себя двумерное представление результатов измерения и цифрового анализа исследуемых полей газодинамических и теплофизических параметров и результатов численного расчета динамических процессов.

Мультиспектральная визуализация — метод исследования в нескольких спектральных диапазонах оптического спектра (обычно от УФ до дальнего ИК). Может использоваться широкополосное излучение или, чаще, комбинация из нескольких узкополосных диапазонов. Диапазоны могут выбираться с помощью спектрально-селективных полосно-пропускающих фильтров. Мультиспектральная визуализация отличается от гиперспектральной меньшим количеством используемых спектральных диапазонов.

В настоящее время развитие методов панорамной визуализации и цифрового анализа тепловых полей определяется во многом внедрением в экспериментальную практику современных программных и электронных средств для ввода в компьютер зарегистрированных изображений и их цифровой обработки.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТОКОВ С ГОРЕНИЕМ

Пространственное распределение тепловыделения является непосредственным следствием режима работы экспериментальной установки. Исследование пространственно-временных характеристик горения может быть проведено посредством регистрации хемилюминесценции химически активных компонентов потока. Чаще всего исследуют из-

лучение электронно-возбужденных радикалов OH^* и CH^* .

Визуализация коротковолнового свечения хемилюминесценции радикала OH^* в ближнем УФ-диапазоне $305 \div 325$ нм считается относительно несложным способом определения зоны начала тепловыделения, так как стадия тепловыделения начинается при достижении высокой концентрации радикалов. Сложность интерпретации интенсивности излучения заключается во влиянии дополнительных мешающих факторов. Так, в области излучения возбужденных радикалов OH^* и CH^* могут присутствовать другие излучающие компоненты, такие как CN , CO и CO_2 . Значительное влияние оказывает непосредственно кислород, молекулы которого ответственны за тушение люминесценции. Следствием является обратная зависимость интенсивности хемилюминесценции от уровня турбулентных пульсаций потока.

Непрерывный тепловой спектр при уровне температур до 2500 К является малозначимой помехой по сравнению с уровнем сигнала хемилюминесценции, учитывая малую плотность частиц сажи в рассматриваемой области. Несмотря на это, было уделено внимание ограничению интервала регистрируемых длин волн оптического диапазона с помощью интерференционных фильтров, с тем чтобы уменьшить влияние теплового континуума, а также исключить из поля зрения элементы конструкций с высокими коэффициентами рассеивания излучения.

Были проведены предварительные исследования пропускания и поглощения УФ-излучения материалами, используемыми в оптическом тракте, на выбранных длинах волн, так как эти параметры значительно отличались от наблюдавшихся в видимом диапазоне длин волн. Уделено особое внимание типам матриц. С используемых матриц удалялись так называемый hotmirror-фильтр, УФ-фильтр, интерференционные фильтры ($410 \div 690$ нм) и anti-aliasing-фильтры (стекла пространственной фильтрации излучения). Для компенсации рабочего отрезка применялись высокоточные оптические пластины из плавленого кварца пропускающего УФ-излучение.

ВАЛИДАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для валидационных экспериментальных исследований предпочтительны собственные

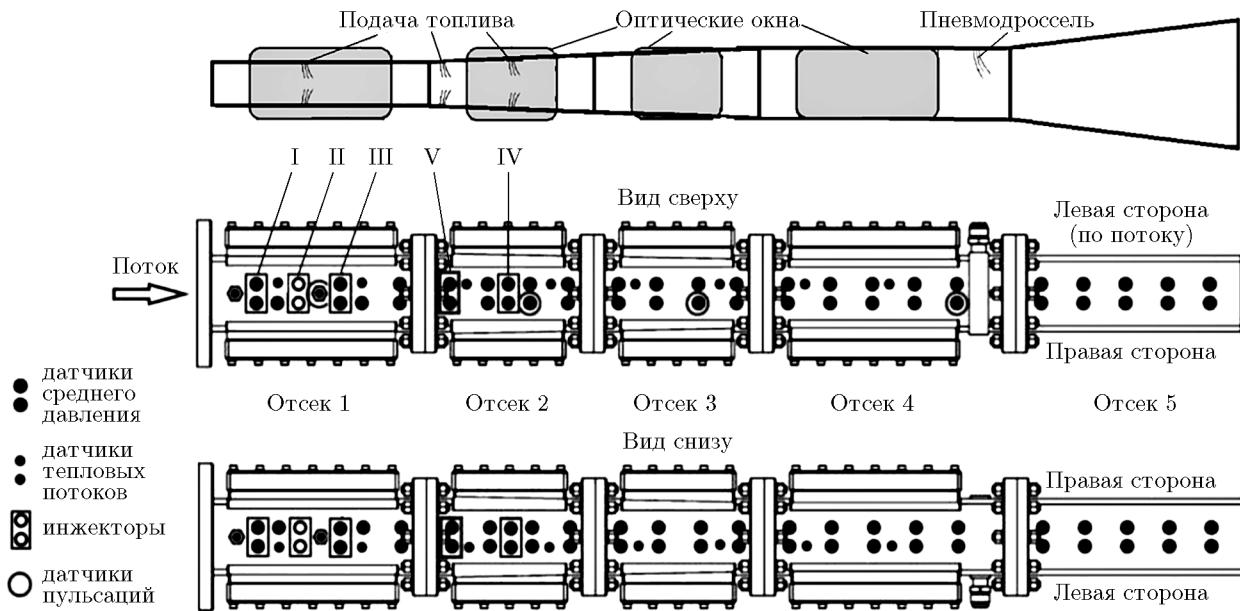


Рис. 1. Геометрия экспериментальной модели с указанием мест подачи топлива и установки датчиков:

I — 1-й пояс подачи топлива (не используется), II — 2-й пояс, III — 3-й пояс (не используется), IV — 4-й пояс, V — 5-й пояс подачи топлива

базы экспериментальных данных, когда расчетчик имеет полный доступ ко всем деталям эксперимента, когда эксперимент ставится с учетом его запросов и когда имеется возможность обсуждать возникающие проблемы расчетов с авторами эксперимента.

Поэтому в ЦАГИ были проведены аэродинамические эксперименты на стенде, специально подготовленные для получения новых экспериментальных данных по высокоскоростным течениям с горением в каналах, ориентированных на валидацию физических моделей и программного обеспечения.

Для упрощения численного моделирования и исключения посторонних физических эффектов выбрана и изготовлена модель простейшей геометрии — расширяющийся канал постоянной ширины с подачей газообразного топлива (этилен) со стенок, без специальных устройств для стабилизации горения (рис. 1).

Симметричный канал включает в себя два отсека постоянной высоты — отсеки 1 и 4 на рис. 1, между которыми расположен участок с непрерывным расширением канала, разделенный на два коротких отсека 2 и 3. Хвостовая часть модели выполнена в виде расширяющегося отсека 5.

Эксперименты проводились в режиме при соединенного воздуховода, поступающий воз-

дух нагревался огневым подогревателем. Для проведения испытаний выбран следующий диапазон режимов течения на входе в канал экспериментальной модели: число Маха $M = 2.5$, температура торможения $T_0 = 1650 \div 2150$ К, давление торможения $p_0 = 15$ атм. Топливо впрыскивалось в начале экспериментального канала через две пары отверстий в верхней и нижней стенках, перпендикулярно потоку. В модели предусмотрено пять мест подачи топлива — три в первом отсеке и два во втором (пояса подачи топлива I—V, см. рис. 1). Изменение режима течения достигалось за счет варьирования температуры торможения и массового расхода топлива. В конце канала, на верхней стенке последнего отсека постоянной высоты, установлен пневмодроссель. Он обеспечивал возможность временной генерации струи сжатого воздуха с целью инициирования горения [2].

Модель изготовлена из нержавеющей жаростойкой стали. Активное охлаждение стенок отсутствует. На боковых стенках канала установлены четыре пары оптических окон из кварцевого стекла толщиной 50 мм (см. рис. 1).

С целью визуализации структуры течения предусмотрен широкий спектр измерений: высокоскоростная шлирен-видеосъемка; визуализация излучения радикалов OH^* и CH^* (хими-

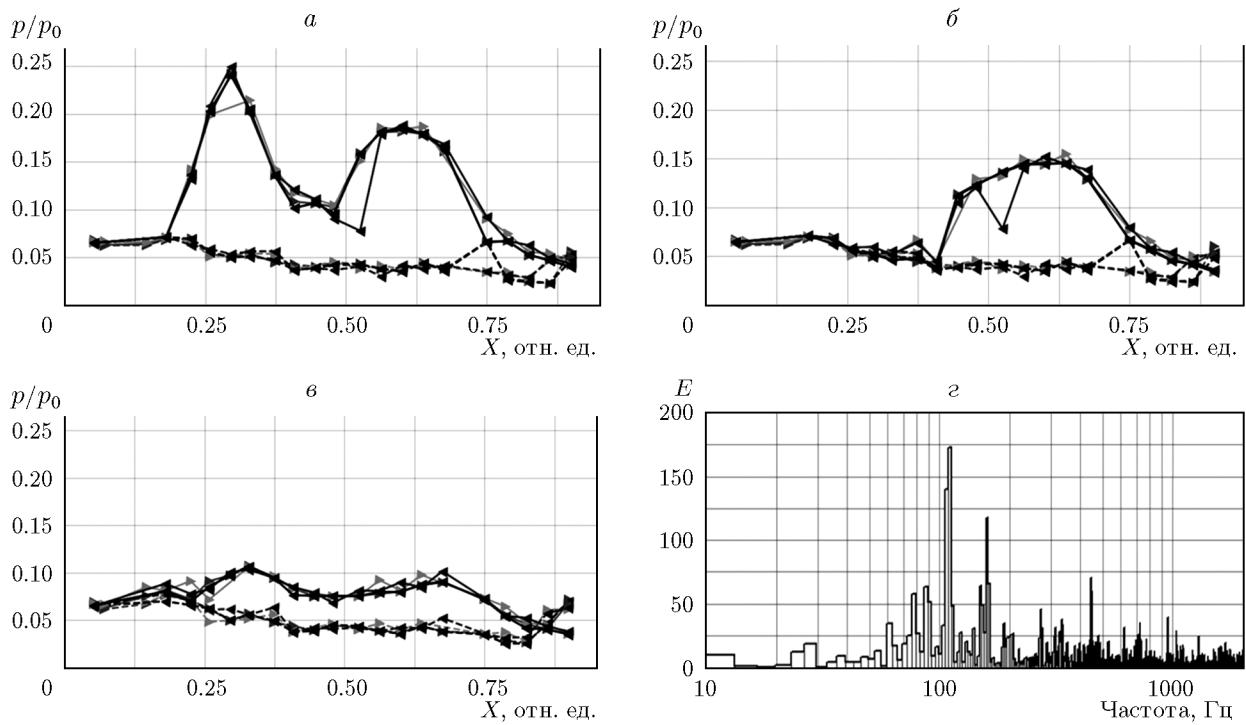


Рис. 2. Распределения давления по стенкам канала в трех наиболее типичных режимах (а–в), спектр пульсаций давления (г), соответствующий режиму б

люминесценция) для обнаружения области тепловыделения; измерение температуры стенки термопарами, установленными внутри стенок канала и на его внешней поверхности; регистрация осредненных по времени распределений статического давления вдоль стенок. Схема измерений показана на рис. 1.

Модель присоединена к соплу $M = 2.5$, которое располагалось ниже по потоку от огневого подогревателя. Модель фиксировалась специальной штангой и входила хвостовой частью в отверстие в торцевой стенке вакуумной камеры. Такой способ крепления модели допускает продольные деформации модели вследствие нагрева.

Вакуумная камера обеспечивала низкое давление (0.15 атм) на выходе модели, предотвращая влияние внешнего потока при выходе на структуру течения внутри канала. Инжекторы для подачи топлива были соединены в единую систему с общим резервуаром, что создавало одинаковое полное давление во всех инжекторах. Прибор Теплера, расположенный перпендикулярно оптическим окнам модели, позволял проводить визуализацию течения внутри канала. Прибор можно было перемещать вдоль модели для получения изобра-

жений течения через разные оптические окна.

Анализ результатов проведенных измерений включал в себя спектральный анализ пульсаций давления (рис. 2, г), сопоставление видеозображений в видимом, ультрафиолетовом (хемилюминесценция OH^*), видимом и инфракрасном (хемилюминесценция CH^*) диапазонах и теневой картины течения, а также результаты квазиодномерных расчетов, основанных на полученных в экспериментах распределениях давления. Обнаружено пять различных режимов стабилизации горения в канале. В трех из них ($T_0 \approx 1700$ К, коэффициент избытка окислителя $\alpha = 1.5 \div 3$) реализован режим горения с запиранием канала и формированием псевдоскачка с двумя (рис. 2, а) или одним (рис. 2, б) максимумами в распределениях давления. В двух других ($T_0 = 1950 \div 2150$ К, $\alpha = 3$) реализован высокоскоростной режим горения без запирания канала. Тип стабилизации горения в режимах, показанных на рис. 2, а–в, подтверждался теневой картиной течения, а в режимах, показанных на рис. 2, б, в, — также и данными квазиодномерных расчетов. Наиболее развитые низкочастотные пульсации наблюдались в области тепловыделения (рис. 2, г).

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ПАНОРАМНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Аэрофизический эксперимент, проводимый для исследования реагирующих потоков, требует в целях изучения поведения потока и взаимодействия гетерогенных сред применения средств контроля, управления и измерения энергетических параметров.

Была разработана многоканальная система мультиспектральной panoramicной визуализации. Мультиспектральность данной системы обеспечивается задействованием в ней различных типов датчиков (матричных камер), чувствительных к излучению различных участков оптического спектра в широком диапазоне длин волн. Панорамность системы реализуется путем применения датчиков, каждый из которых представляет собой чувствительную матрицу. На рис. 3 представлены элементы, входящие в систему мультиспектральной визуализации.

Система состоит из девяти панорамных каналов — чувствительных матричных камер с соответствующей оптической системой,

включающей в себя необходимое количество интерференционных полосно-пропускающих фильтров, формирующих соответствующие профили спектральной чувствительности камер. Дополнительно к панорамным каналам, проводилась регистрация информации с двух спектральных каналов с целью анализа эмиссионных спектров излучения потока.

Каналы 5–9 предназначены для визуализации и диагностики физических и химических явлений, протекающих в процессе высокоскоростного горения. Схема расположения средств визуализации во время испытаний экспериментальной модели на стенде представлена на рис. 4.

Канал 5 отвечает за регистрацию в области ближнего ИК-излучения (810 \div 1040 нм) хемилюминесценции CH^* и теплового континуума. Канал 6 работает на длинах волн ближнего УФ (310 \div 370 нм) и фиксирует хемилюминесценцию OH^* . Канал 7 работает на монохроматической длине волны излучения в области ближнего ИК-диапазона длины волн 808 нм и регистрирует теневую картину течения. Канал 8 осуществляет визуализацию

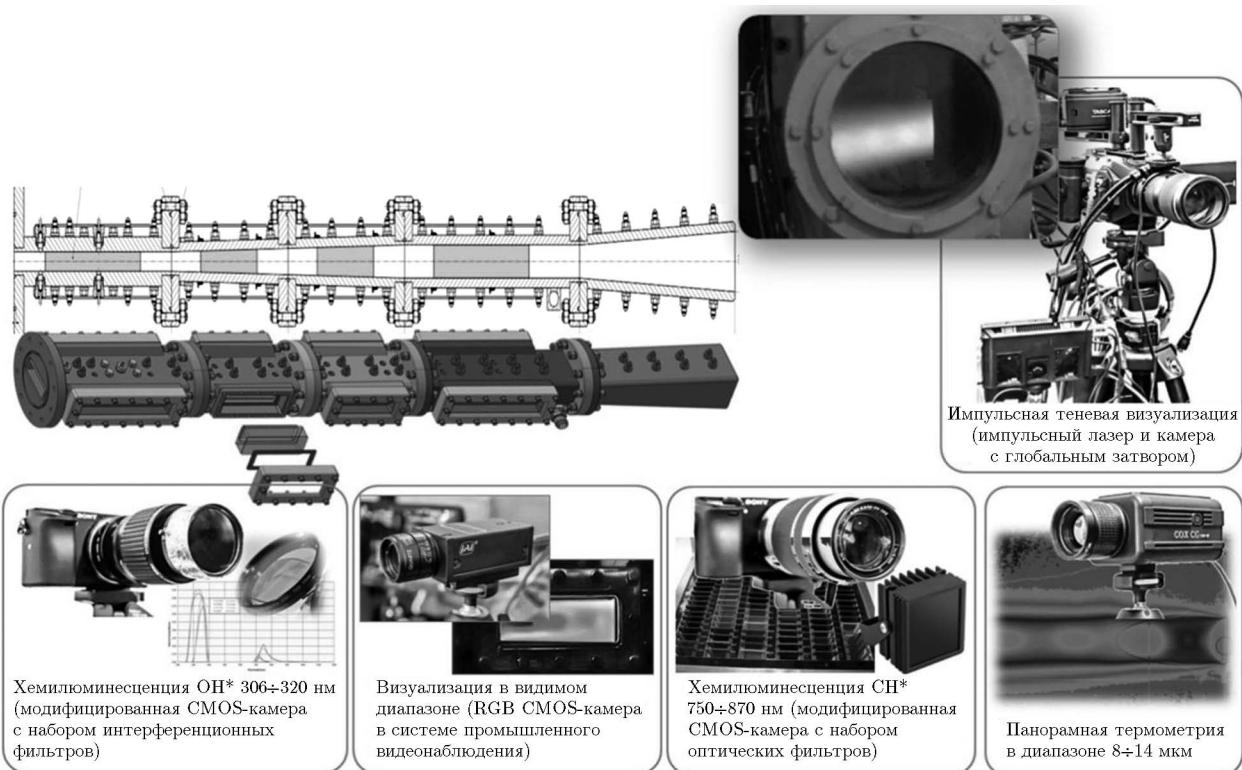


Рис. 3. Элементы многоканальной системы мультиспектральной визуализации

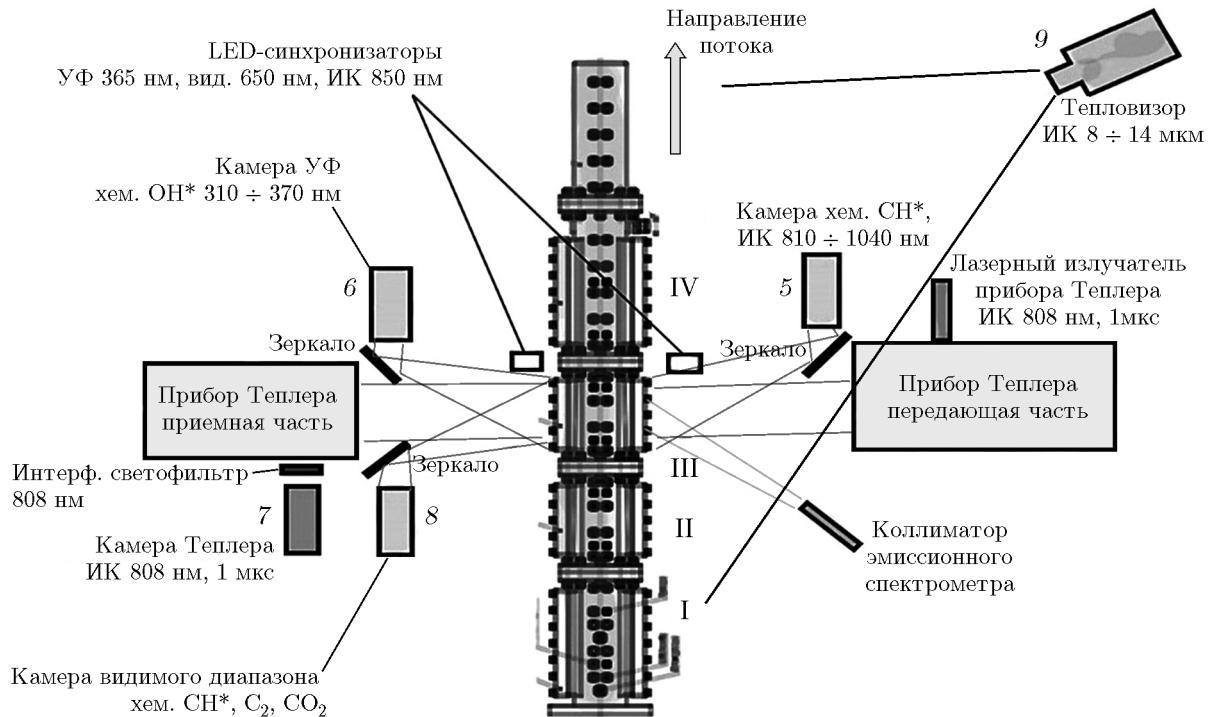


Рис. 4. Схема расположения диагностических каналов 5–9 панорамной спектральной визуализации на аэродинамическом стенде для моделирования горения при испытаниях модели канала

излучения в видимом RGB-диапазоне 410 ÷ 680 нм и фиксирует излучение компонентов CH*, C₂*. Канал 9 представляет собой тепловизионную камеру с матричным болометром неохлаждаемого типа с чувствительностью в диапазоне 8 ÷ 14 мкм, которая регистрирует поле температур внешней стенки модели.

Как известно, исследование спектра излучения в ближнем УФ-диапазоне оптического спектра дает возможность воспользоваться излучением хемилюминесценции радикала OH* для определения положения областей тепловыделения. Развитие горения в экспериментальной модели сопровождается появлением люминесцентного излучения радикалов OH*, возбуждаемых за счет переноса энергии к ним от продуктов химических реакций процесса горения. Яркость такого излучения сильно зависит от концентраций компонентов реакций, при которых образуется радикал OH* [3]. Исследование пространственного распределения интенсивности хемилюминесценции позволяет, учитывая вид экзотермических реакций окисления горючего, уточнять химическую кинетику процесса.

При регистрации излучения использовалась полоса в диапазоне длин волн $\lambda = 280 \div 350$ нм (начало полосы 306 нм) с максимумом

в области 307 ÷ 315 нм. Как известно, особенностью коротковолновых фильтров является пропускание ими ближнего ИК-излучения, что вместе с высокой чувствительностью матриц в этой области и сильным сигналом теплового излучения создает сильные помехи, во много раз превышающие полезный сигнал. Решением явилось применение многослойных интерференционных фильтров с широкой полосой пропускания и резкими зонами подавления сигнала, в том числе в ближнем ИК-диапазоне.

Формирование изображений на чувствительных матрицах проводилось с помощью ультрафиолетовых кварцевых объективов — UV lens 77.5mm, QuartsHGS и Goyo 25mm/0.5 на полосу пропускания 230 ÷ 1 100 нм.

Сигнал регистрировался с помощью двух типов камер: высокого разрешения с потоковой передачей видео — модифицированных камер Sony 6300; камерой с глобальным затвором JAI Pulnix CM140-2 SUV. Камеры высокого разрешения были внедрены в общую сеть промышленного наблюдения стенда посредством специализированного видеосервера. Для настройки систем видеорегистрации применялись обычные бытовые ртутные УФ-облучатели, для чего использовался бытовой излучатель ультрафиолетовый ОУФК-09-01 и система спек-

тральных оптических неорганических светофильтров.

Отдельно стоит отметить разработанный компактный блок LED-синхронизаторов. Блок жестко фиксируется на внешней стенке экспериментальной модели таким образом, чтобы попадать в кадр съемки камер мультиспектральной системы визуализации, и состоит из трех светодиодов: светодиод для УФ-области 365 нм, светодиод для видимой области 650 нм и светодиод для ИК-области 850 нм. Блок светодиодов синхронизирован с подачей топлива в экспериментальную модель.

В исследованиях проводилась обработка изображений излучения обоих компонентов OH^* и CH^* , но основное внимание уделялось излучению OH^* , так как оно реализуется в области $\lambda = 305 \div 325$ нм ближнего УФ-диапазона, который регистрировался отдельной камерой и меньше подвергался влиянию мешающих компонентов.

Исследование эмиссионных спектров излучения потока с горением, полученных после первой серии испытаний, показало наличие излучающих «мешающих» компонентов — железа (Fe), меди (Cu), магния (Mg), циана (CN), диуглерода (C_2), натрия (Na I, 589 нм) и калия (K I, 766 нм) и тепловое излучение содержащейся в потоке сажи (рис. 5).

Для последующих серий испытаний система мультиспектральной визуализации была модифицирована посредством разделения каналов RGB-камеры оптического диапазона (рис. 6). Это сделано по причине того, что на изображении синего канала регистрировав-

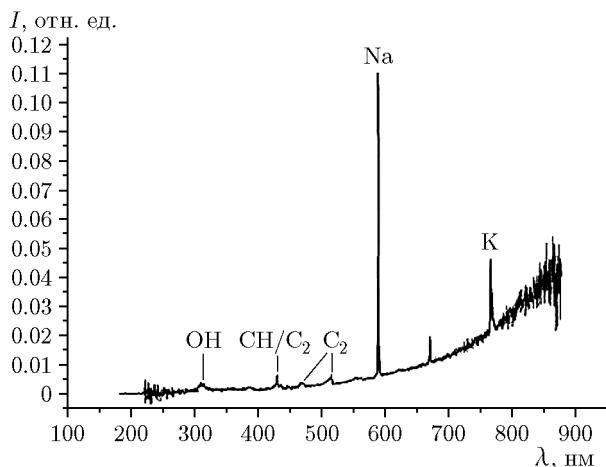


Рис. 5. Пример зарегистрированного эмиссионного спектра

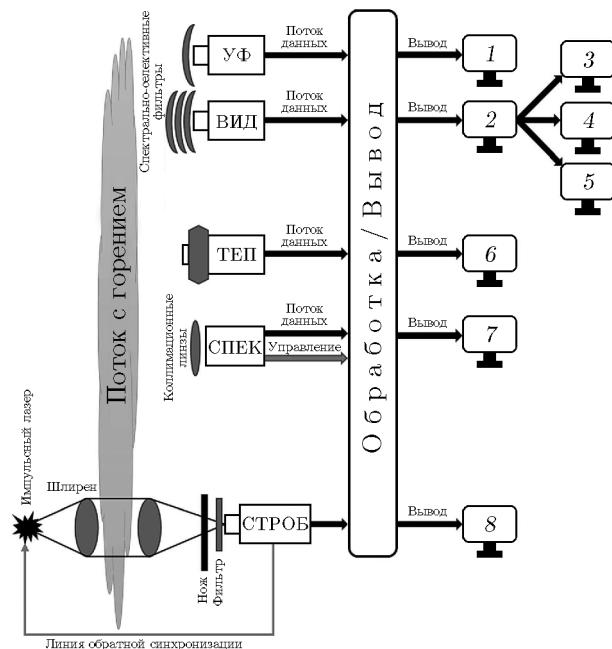


Рис. 6. Модифицированная система мультиспектральной визуализации:

УФ — ультрафиолетовая камера, ВИД — камера видимого диапазона, ТЕП — тепловизионная камера дальнего инфракрасного диапазона, СПЕК — линейный спектрограф, СТРОБ — стробируемая камера на длину волны излучения импульсного лазера, 1 — вывод распределения излучения хемилюминесценции OH^* (сигнал с УФ-камеры), 2 — вывод цветного изображения видимого диапазона, 3 — вывод хемилюминесценции CH^* (сигнал с камеры видимого диапазона, канал синего), 4 — вывод излучения колебательных полос молекулы углеродца C_2 (полосы Свана) атомарного натрия (сигнал с камеры видимого диапазона, канал зеленого), 5 — вывод излучения атомарного натрия и теплового излучения сажи (сигнал с камеры видимого диапазона, канал красного), 6 — вывод поля распределения температуры поверхности экспериментальной модели и иллюминаторов (сигнал с камеры дальнего ИК-диапазона), 7 — вывод эмиссионного спектра излучения потока (регистрация через основной иллюминатор системы мультиспектральной визуализации), 8 — вывод теневой картины потока.

лось всего несколько спектральных излучающих компонентов потока — линии хемилюминесценции возбужденного радикала CH^* , молекулярные полосы Свана C_2 , а также коротковолновый хвост теплового континуума излучения сажи. Исследование эмиссионных спектров показало, что основной вклад в излучение в данном спектральном диапазоне вносит именно хемилюминесценция CH^* . Интеграл от теплового континуума также имеет достаточно высокую интенсивность, но он присутствовал

на всех панорамных каналах и его можно было оценить и вычесть.

Исследование спектров излучения потока позволило разработать методику количественного учета вклада указанных компонентов и провести коррекцию распределения излучения возбужденного радикала OH^* для максимального соответствия распределению относительной скорости тепловыделения в потоке с горением.

Необходимо отметить, что интенсивная турбулентность потока может привести к активному взаимодействию возбужденного радикала OH^* с молекулами кислорода, что вызывает безызлучательную релаксацию и может способствовать тушению люминесценции. Предполагалось определение интенсивности турбулентности и ее пространственного спектрального состава для учета степени тушения хемилюминесценции. В качестве импульсного источника зондирующего излучения был применен полупроводниковый импульсный лазер. Монохроматическое излучение лазера способствовало спектральной дискриминации собственного свечения потока для исключения снижения контраста теневой картины течения.

После процедуры коррекции данных, полученных от разработанной системы визуализации, было проведено сопоставление данных. Пример такого сопоставления представлен на рис. 7. На рис. 7, *а* запечатлен момент горения в канале экспериментальной модели. Согласно рис. 7, *б* есть возможность локализовать зону горения, а следовательно, энерговыделения, исходя из общей длины экспериментальной модели. Разработанная система визуализации позволяет наглядно показать процессы, происходящие в канале экспериментальной модели в заданный момент, и, соответственно, визуализировать зону энерговыделения.

В итоге успешная реализация системы панорамной визуализации обеспечила регистрацию сигнала хемилюминесценции возбужденного радикала OH^* с возможностью нивелирования «мешающих» спектральных компонентов. Основные элементы системы: механическая система сопряжения с исследуемой моделью на экспериментальном стенде; оптическая система; регистрирующее устройство с аппаратным устройством записи данных, включающее в себя специализированные УФ-камеру и регистратор; компоненты для настройки; звуковой канал синхронизации; видеосервер для

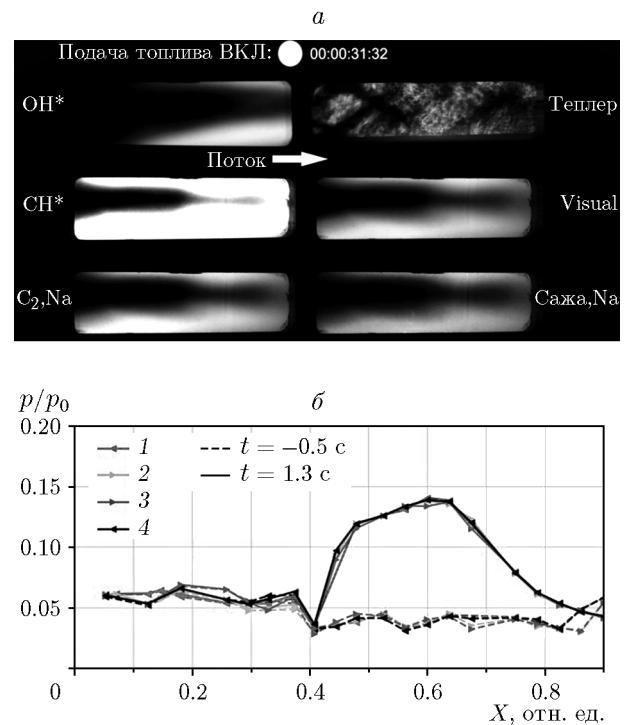


Рис. 7. Пример сопоставления данных, полученных от системы визуализации, с экспериментальными данными со стенда:

штриховые линии — режимы горения без запирания, сплошные линии — с запиранием; 1–4 — ряды датчиков среднего давления (см. рис. 1)

сопряжения с системой промышленного наблюдения; компьютерная система управления и записи данных; дисплей мониторинга процесса в реальном времени; система обработки потоковых данных. Применялся унифицированный подход по типу используемых составных компонентов и интерфейсам передачи данных, что позволило обеспечить совместимость и взаимозаменяемость компонентов и при необходимости возможность оперативного перехода с одной схемы регистрации на другую.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА С ЧИСЛЕННЫМ РАСЧЕТОМ

Полученные экспериментальные данные использовались для валидации программы zFlare [4], разработанной в лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением ЦАГИ.

Рассмотрим в качестве примера расчет режима с высокоскоростным горением без запирания канала на базе осредненных по времени нестационарных уравнений Рейнольдса

(URANS), замкнутых моделью турбулентности SST. Взаимодействие турбулентности с горением не учитывалось. Для описания горения этилена в воздухе применялся скелетный кинетический механизм C_2H_4 -red, состоящий из 23 веществ и 49 реакций. Этот механизм разработан специалистами ООО «КИНТЕХ Лаб» [5] в рамках сотрудничества с ЦАГИ. Механизм оптимизирован для описания течения в экспериментальной модели ЦАГИ. Информация об изменении параметров течения вдоль линий тока взята из предварительных расчетов течения, выполненных с использованием квазиглобального кинетического механизма [6]. В расчетах использовался конечно-объемный численный метод второго порядка аппроксимации по всем переменным [7].

Рассматривался режим течения с параметрами в подогревателе $T_0 = 2150$ К, $p_0 \approx 1.4 \cdot 10^6$ Па и расходом воздуха (загрязненного продуктами сгорания в подогревателе) $G_{bx} \approx 1.268$ кг/с. Расход топлива определялся из условия $\alpha = G_{bx}/(14.8G_{C_2H_4}) \approx 2.7$.

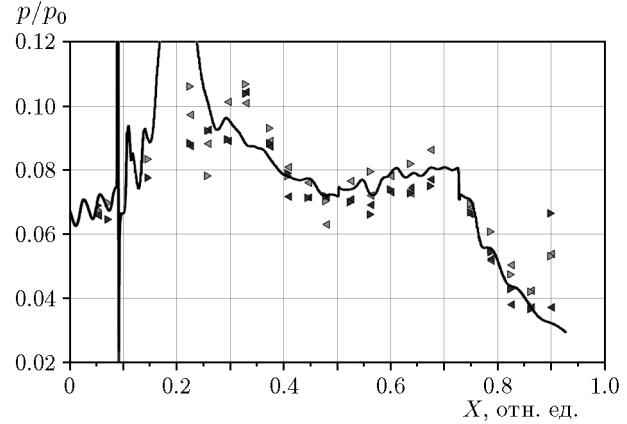


Рис. 8. Результаты численного моделирования эксперимента ЦАГИ:
точки — эксперимент (от разных датчиков в одном сечении), кривая — результат RANS-расчета с кинетикой C_2H_4 -red

Топливо подавалось в пояс II (см. рис. 1) с верхней и нижней стенок канала, перпендикулярно стенкам, через отверстия диаметром 2 мм со звуковой скоростью.

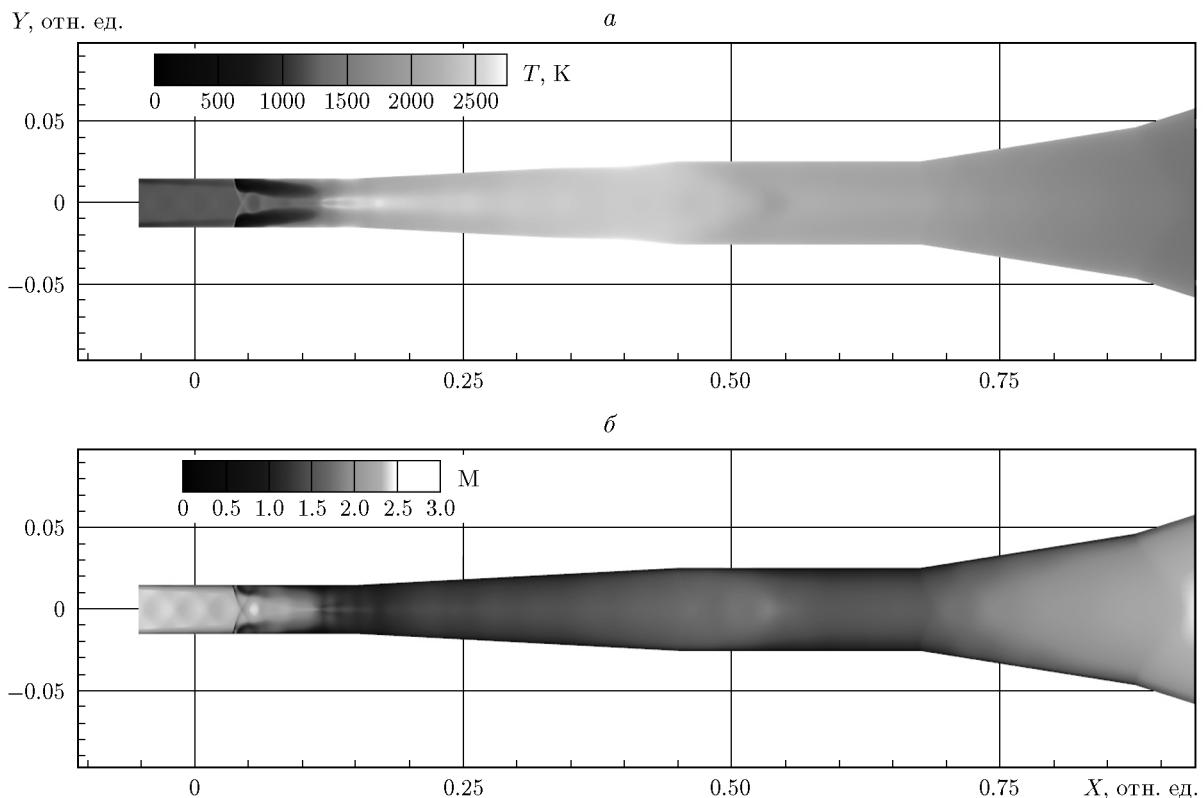


Рис. 9. Результаты RANS-расчетов с использованием скелетного механизма C_2H_4 -red: поле температуры (a) и поле чисел Maxa (б)

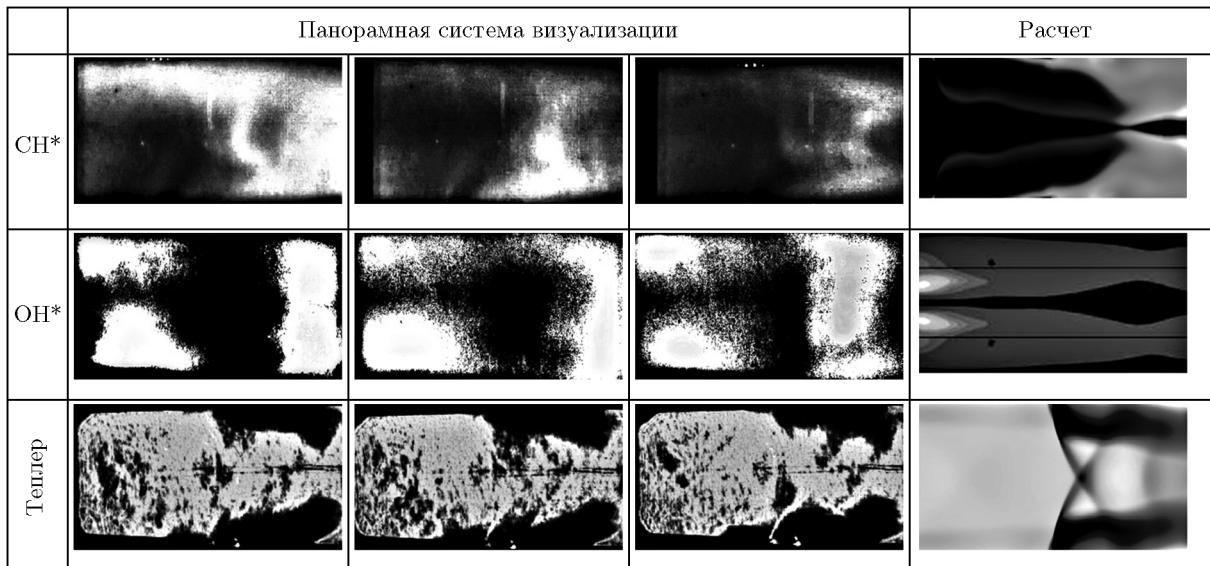


Рис. 10. Сопоставление данных эксперимента с расчетом для режима $T_0 = 2150$ К, $\alpha = 2.8$, окно 2, 2-й пояс подачи топлива

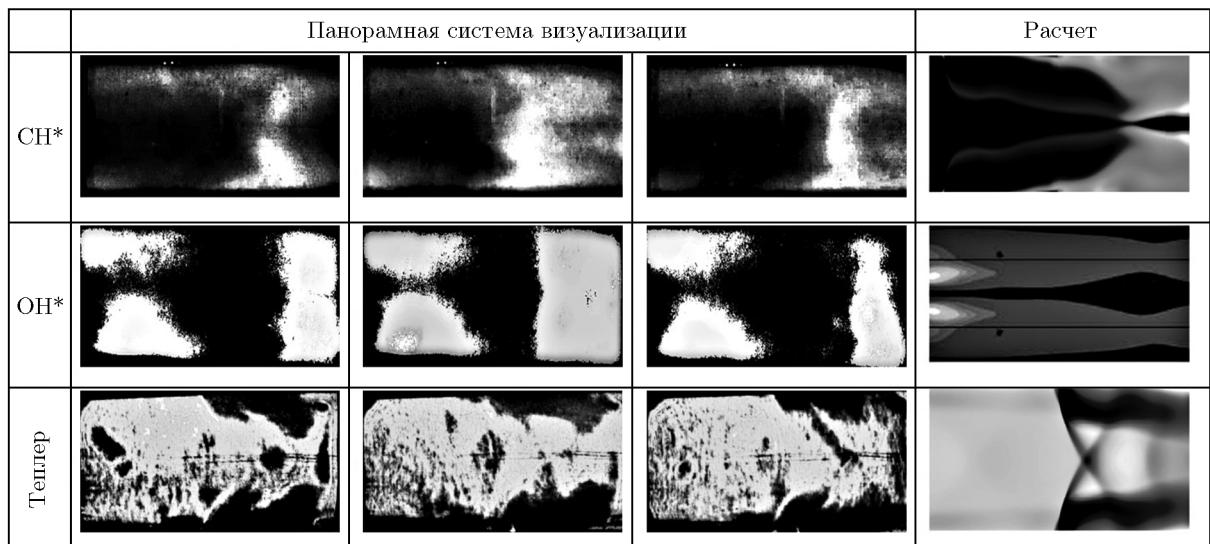


Рис. 11. Сопоставление данных эксперимента с расчетом для режима $T_0 = 2150$ К, $\alpha = 2.65 \div 2.7$, окно 2, 2-й пояс подачи топлива

Если в предварительных расчетах с использованием квазиглобального кинетического механизма [6] приходилось принимать искусственные действия для поджига этилена, то при использовании механизма C_2H_4 -red этилен самовоспламеняется, как это было и в эксперименте. После полного установления поля течения получается кривая, достаточно близкая к экспериментальным данным (рис. 8). Правда, главный пик давления завышен; это может быть связано с неточным заданием условий теплообмена на стенках и другими второ-

степенными причинами. На рис. 9 представлены поля температуры и числа Маха, полученные в установившемся решении.

После проведения экспериментальных исследований, сортировки, анализа и обработки данных, полученных с панорамной системы визуализации, а также проведения компьютерного расчета была предпринята попытка сопоставления полученных картин течений. Для сравнения с расчетом взяты два разных экспериментальных пуска с близкими параметрами режима течения (рис. 10 и 11), и в каждом

пуске выбраны три момента времени на этапе установившегося течения с горением. Для сопоставления с полученными в экспериментах изображениями хемилюминесценции OH^* были выполнены дополнительные расчеты ($T_0 = 2150 \text{ K}$, $p_0 = 1.4 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $G_{\text{вх}} = 1.268 \text{ кг/с}$, $\alpha = 2.7$), которые позволяют по уже имеющемуся установившемуся полю течения, полученному в расчете, определить массовую долю возбужденных радикалов OH^* . Для этого использовалась модель [8]. Поскольку в расчетах не определялась массовая доля CH , для сопоставления с экспериментальными изображениями хемилюминесценции CH^* использовались полученные в расчете поля CH_3 , имевшие по-добную структуру.

Анализ рис. 10 и 11 показал следующее. Во-первых, в картинах течения, полученных экспериментально и численно, наблюдается определенное сходство форм структур горения, несмотря на наличие колебаний пламени в процессе пуска экспериментального стенда. Во-вторых, структуры горения, полученные экспериментально и численно, развиваются примерно в одинаковых местах канала экспериментальной модели — на стыке первого и второго отсеков экспериментальной модели, при переходе с постоянного сечения канала на расширяющийся, в зоне второго (по потоку) оптического окна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и реализована комплексная панорамная мультиспектральная система визуализации потоков с горением. Проведена апробация на экспериментальном стенде, результаты сопоставлены с модельными расчетами. Представленная система обладает значительной гибкостью в применении.

Большинство известных устройств для визуализации пламени настроены на один спектральный компонент и визуализируют не комплексные характеристики, а интенсивность излучения отдельного спектрального компонента. Получение комплексных характеристик пламени связано с повышением количества разнородных измерительных каналов в системе визуализации и с применением интенсивной обработки зарегистрированных данных, т. е. применением многоканальных мультиспектральных систем.

Разработанная система панорамной мультиспектральной визуализации для исследова-

ния процессов горения позволит при соответствующей обработке комплексных данных одновременно получать поля спектральных температур, относительных скоростей тепловыделения и значений полноты сгорания, что максимально полно характеризует процессы горения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (договор № 14.G39.31.0001 от 13 февраля 2017 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shiryaeva A., Sabelnikov V. Critical analysis of classical turbulent combustion experiments on the basis of RANS simulations // AIP Conf. Proc. — 2018. — V. 2027, N 1. — 030078. — DOI: 10.1063/1.5065172.
2. Сабельников В. А., Пензин В. И. К истории исследований в области высокоскоростных ПВРД в России. — М.: Изд-во ЦАГИ, 2008.
3. Najm H. N., Paul R. H., Mueller C. J., Wyckoff P. S. On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate // Combust. Flame. — 1998. — V. 113, N 3. — P. 312–332. — DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00209-5.
4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019610822. Программа для численного моделирования трехмерных течений с горением в каналах прямоточных воздушно-реактивных двигателей в рамках подходов URANS и DES с применением моделей взаимодействия турбулентности с горением, технологии дробного шага по времени и метода пристеночных функций (zFlare) / Власенко В. В., Михайлов С. В., Молов С. С., Трошин А. И., Ширяева А. А. — Заявл. 28.12.2018. — Зарегистр. 18.01.2019. — Опубл. 15.07.2022.
5. <https://www.kintechlab.com/ru/>.
6. Singh D. J., Jachimowski C. J. Quasiglobal reaction model for ethylene combustion // AIAA J. — 1994. — V. 32, N 1. — P. 213–216. — DOI: 10.2514/3.11972.
7. Власенко В. В. О математическом подходе и принципах построения численных методологий для пакета прикладных программ EWT ЦАГИ // Тр. ЦАГИ. — 2007. — Вып. 2671. — С. 20–85.

8. **Kathrotia T., Riedel U., Seipel A., Moshammer K., Brockhinke A.** Experimental and numerical study of chemiluminescent species in low-pressure flames // *Appl. Phys. B.* — 2012. — V. 107, N 3. — P. 571–584. — DOI: 10.1007/s00340-012-5002-0.

*Поступила в редакцию 19.02.2024.
Принята к публикации 21.02.2024.*
