

Development of a Methodology for Constructing Multi-Block Structured Grids in Gmsh

R. K. Seleznev^{1,2}, M. K. Ermakov²

¹*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, 127055, Russia*

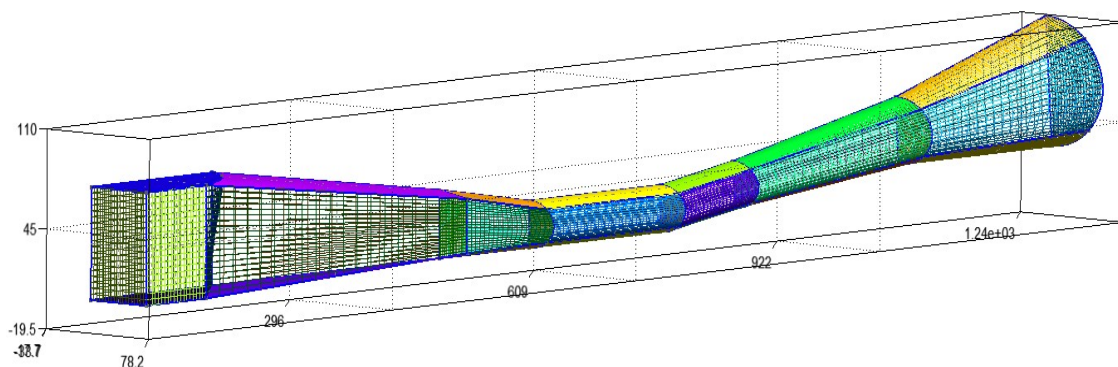
²*Ishlinsky Institute for Problem in Mechanics of the Russian Academy of Science
(IPMech RAS), Moscow, 119526, Russia*

rkseleznev@gmail.com; ermakov@ipmnet.ru

Abstract

This paper is devoted to the development and validation of an efficient technology for constructing multi-block structured computational grids in the open-source Gmsh software package for modeling thermogasdynamics processes in combustion chambers. The complex geometry of combustion chambers, characterized by the presence of internal details and variable shapes, presents significant challenges in generating high-quality grids required for accurate CFD calculations. Unstructured grids often demonstrate low accuracy when calculating heat fluxes and phenomena with strong gradients, while fully structured grids are not applicable to such objects. This paper proposes an approach to decomposing the combustion chamber geometry into computational blocks and describes a method for sequentially constructing structured grids within each block, followed by their merging. Examples of constructed multi-block grids for combustion chambers of similar shapes are presented, as well as the results of preliminary numerical calculations demonstrating adequate resolution of key zones and physical phenomena.

Keywords: structured meshes, numerical modeling, finite element method, mesh generation, preliminary calculations



An example of a constructed multi-block grid

УДК 621.039.05, 621.039.06, 539.1

Разработка методики построения многоблочных структурированных сеток в Gmsh

Р. К. Селезнев^{1,2}, М. К. Ермаков²

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,
Россия, Москва, 127055, ул. Суцёвская, д.22*

² *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1,
rkseleznev@gmail.com; ermakov@ipmnet.ru*

Аннотация

Настоящая статья посвящена разработке и апробации эффективной технологии построения многоблочных структурированных расчетных сеток в свободно распространяемом программном комплексе Gmsh для моделирования термогазодинамических процессов в камерах сгорания. Сложная геометрия камер сгорания, характеризующаяся наличием внутренних деталей и переменными формами, представляет значительные трудности при генерации качественных сеток, необходимых для точных CFD-расчетов. Неструктурированные сетки часто демонстрируют низкую точность при расчете тепловых потоков и явлений с сильными градиентами, тогда как полностью структурированные сетки не применимы к таким объектам. В работе предложен подход к декомпозиции геометрии камеры сгорания на вычислительные блоки и описана методика последовательного построения структурированных сеток внутри каждого блока с последующим их объединением. Представлены примеры построенных многоблочных сеток для камер сгорания схожей формы, а также результаты предварительных численных расчетов, демонстрирующие адекватное разрешение ключевых зон и физических явлений.

Ключевые слова: Gmsh, многоблочные сетки, структурированные сетки, численное моделирование, конечно-элементный метод, построение сеток, предварительные расчеты.

1. Введение

Проблема построения эффективных численных сеток является фундаментальной и критически важной для успешного решения задач механики, гидродинамики, теплопередачи и других областей прикладной математики и инженерных расчетов. Современный прогресс в этих областях во многом зависит от возможности точного и надежного моделирования сложных физических явлений, которые, в свою очередь, определяются свойствами используемых численных методов и качеством построенных расчетных сеток. Необходимость в эффективных сетках обусловлена ростом вычислительных требований. Сложность задач моделирования постоянно увеличивается: растут размеры расчетных областей, усложняются физические модели (турбулентность, химические реакции, многофазные течения, деформации), возникает потребность в учете большего количества физических эффектов. Для адекватного разрешения этих процессов требуются сетки с миллионами, а иногда и миллиардами ячеек. Неэффективная сетка приводит к неоправданно большим вычислительным затратам, увеличению времени решения задачи и, как следствие, к удорожанию и задержке разработки.

Качество сетки напрямую влияет на точность получаемых результатов. Неправильная дискретизация расчетной области может приводить к численным погрешностям, искажению физических явлений, неверной передаче информации о градиентах и, в конечном счете, к получению неадекватных результатов моделирования. Например, в задачах гидродинамики некачественная сетка может приводить к численному рассеянию, а в задачах теплопередачи – к неточному расчету тепловых потоков. Выбор оптимального типа сетки, плотности ячеек, их формы и ориентации является ключевым для обеспечения достоверности результатов.

Существует несколько основных типов расчетных сеток, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Неструктурированные сетки, наиболее распространенный тип, легко генерируются для сложных, произвольных геометрических форм. Они состоят из простых ячеек (тетраэдры, призмы, гексаэдры и пирамиды), не имеющих строгой топологической связи между собой. Основное преимущество – гибкость в работе со сложной геометрией. Однако, высокая степень нерегулярности ячеек может приводить к численным погрешностям, особенно при моделировании явлений с сильными градиентами, таких как турбулентность, пограничные слои, зоны химических реакций. В частности, для точного расчета тепловых потоков, где важна корректная передача граничных условий и разрешение градиентов температуры, неструктурированные сетки часто демонстрируют недостаточную точность, требуя избыточного сгущения. Это, в свою очередь, ведет к росту вычислительных затрат.

Структурированные сетки обладают строгой топологической связью между узлами и ячейками, что позволяет легко управлять их ориентацией и параметрами. Они идеально подходят для простых геометрических областей (прямоугольники, цилиндры, сферы). Их ключевое преимущество – высокое качество ячеек, что обеспечивает низкие численные погрешности и высокую вычислительную эффективность. Однако, структурированные сетки плохо адаптируются к сложным геометрическим объектам, требуя сложной декомпозиции или искажения ячеек, что снижает их преимущества.

Многоблочные структурированные сетки, являясь гибридным подходом, объединяют преимущества обоих типов. Сложная расчетная область разбивается на набор более простых вычислительных блоков, внутри каждого из которых строится структурированная сетка. Блоки затем соединяются, образуя единую расчетную сетку. Этот подход позволяет эффективно дискретизировать сложные геометрии, разбивая их на управляемые блоки, сохранять высокое качество ячеек внутри каждого блока, что способствует точности и стабильности расчетов, а также контролировать сгущение сетки локально, концентрируя ячейки в критически важных областях (например, у стенок, в зонах интенсивного смешения или реакции, а также там, где требуется точный расчет тепловых потоков).

Несмотря на очевидные преимущества, генерация многоблочных структурированных сеток остаётся трудоёмкой задачей, требующей значительных временных затрат и экспертных знаний. Большинство коммерческих пакетов (ANSYS Meshing, Pointwise, GridPro) предлагают инструменты для работы с такими сетками, однако их высокая стоимость и закрытость ограничивают доступность для академических исследований. Gmsh, как открытый и бесплатный инструмент с широкими возможностями параметрического моделирования, представляет собой перспективную альтернативу, однако его применение для построения многоблочных структурированных сеток остаётся недостаточно исследованным.

Настоящая работа посвящена описанию методики построения многоблочных структурированных сеток в Gmsh для камер сгорания. Далее представлены примеры сгенерированных сеток, а также результаты предварительных расчетов, демонстрирующие эффективность предложенного подхода.

2. Обзор существующих методов построения гексаэдральных расчётных сеток

В данном разделе описываются возможности создания гексаэдральных (шестигранных) сеток с использованием открытого пакета генерации сеток Gmsh (версия 4.15.2) [1, 2]. Опыт использования Gmsh для создания геометрии областей и автоматического построения тетраэдральных сеток представлен в [3, 4]. Описываемые ниже методы построения гексаэдральных сеток в Gmsh являются достаточно общими и для других пакетов, так как базируются на аналогичных возможностях используемых геометрических ядер. Выбор гексаэдрального элемента сетки в качестве основного связан с его наиболее подходящим способом аппроксимации уравнений в частных производных вычислительной гидродинамики. В отличие от построения удовлетворительного качества тетраэдральных сеток в полностью автоматическом режиме, построение гексаэдральных сеток в автоматическом режиме приводит к сеткам низкого качества и по этой причине не используется.

Для построения гексаэдральных сеток существует несколько подходов, включающих ручные операции. Наиболее используемый подход состоит в разбиении вычислительной области на гексаэдральные подобласти, в каждой из которых строится гексаэдральная сетка на основе метода трансфинитной интерполяции. Несмотря на значительный объем ручной работы, этот подход позволяет получать наиболее качественные сетки для произвольных геометрий. Построение сетки может быть упрощено, если геометрия областей создается на основе операций выталкивания (вытягивания, экструзии) поверхностей или построении вычислительной области по сечениям. К операциям выталкивания относятся выталкивание по вектору, по углу, совместное выталкивание по вектору с вращением, выталкивание по нормали, выталкивание вдоль траектории. Во всех этих случаях первоначальная поверхностная сетка из четырехугольников для выталкиваемой поверхности переходит в пространственную гексаэдральную сетку. На рис. 1 показана сетка, получаемая в результате выталкиваний поверхности по вектору, по углу и совместному выталкиванию по вектора с одновременным вращением. Данная геометрия и сетка реализуются командой скрипта **Extrude** с ключевым параметром **Layers**. Применение данных видов выталкивания ограничено объектами с постоянным сечением, например, трубопроводами круглого сечения. На рис. 2 изображена сетка, получаемая при выталкивании поверхности вдоль траектории, реализуемая командой **Extrude** с ключевым параметром **Using Wire**. Данный способ также подходит только для объектов постоянного сечения с выталкиванием в одной плоскости. Из-за разности длин кривых, образующих боковую поверхность тела, получаемая сетка может быть значительно деформирована, что видно на рисунке. На рис. 3 представлены сетки, созданные методом построения по сечениям для случая трубы квадратного постоянного сечения, реализуемые командой **ThruSections**. В первом варианте (верхний рисунок) используются только два сечения – начальное и конечное, во втором варианте (нижний рисунок) строятся промежуточные сечения, выделенные синим цветом. Использование дополнительных сечений позволяет улучшить качество сетки на поверхности объема.

На рис. 4 представлена сетка для спиралевидной трубы переменного сечения, построенная по сечениям. Метод построения геометрии и сетки по сечениям является наиболее общим, включающим в себя остальные методы в качестве частных случаев. Понятно, что подходы, связанные с выталкиваниями и сечениями, можно использовать только для ограниченных геометрий, за счет вида которых требуется умеренный объем ручной работы.

На рис. 5 представлена сетка для сопла кругового сечения, построенная методом разбиения области на гексаэдральные объемы, для построения согласованных сеток, внутри которых используется метод трансфинитной интерполяции. Данный подход с разбиением вычислительной области на гексаэдральные подобласти является вполне универсальным, но требующим значительного числа ручных операций.

Все описанные способы ручного построения гексаэдральных сеток позволяют создавать необходимые для моделирования в гидродинамике пограничные слои и анизотропные элементы, создание которых невозможно при автоматическом построении тетраэдральных и гексаэдральных сеток.

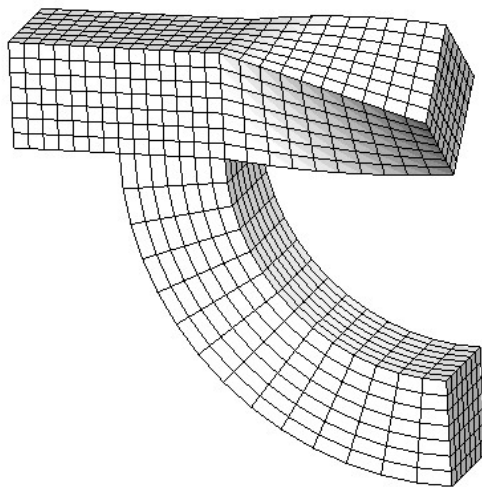


Рис. 1. Выталкивание геометрии и сетки по вектору, по углу и по вектору с вращением

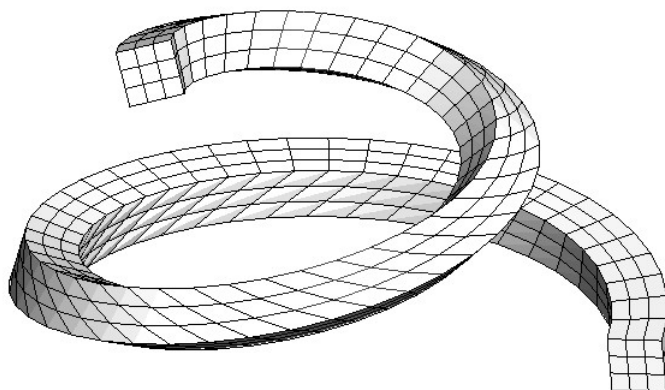


Рис. 2. Выталкивание геометрии вдоль траектории и построение сетки

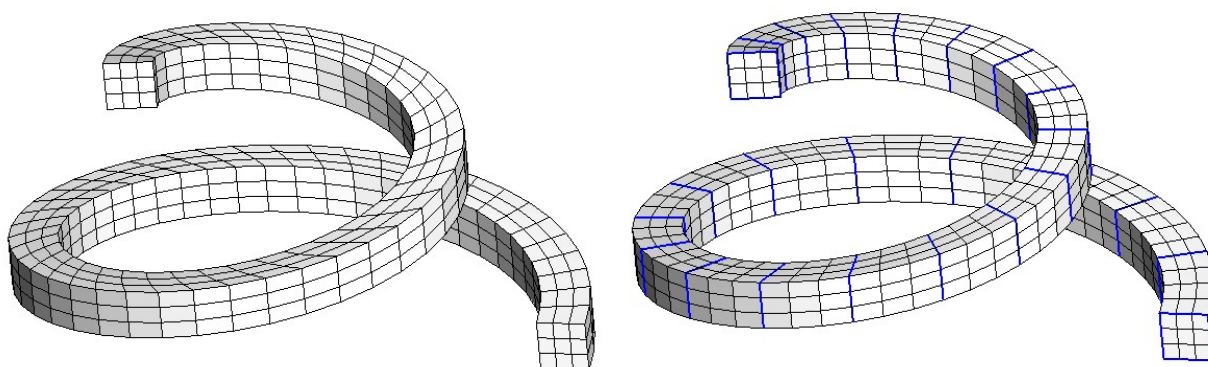


Рис. 3. Построение геометрии и сетки квадратной трубы постоянного диаметра по сечениям

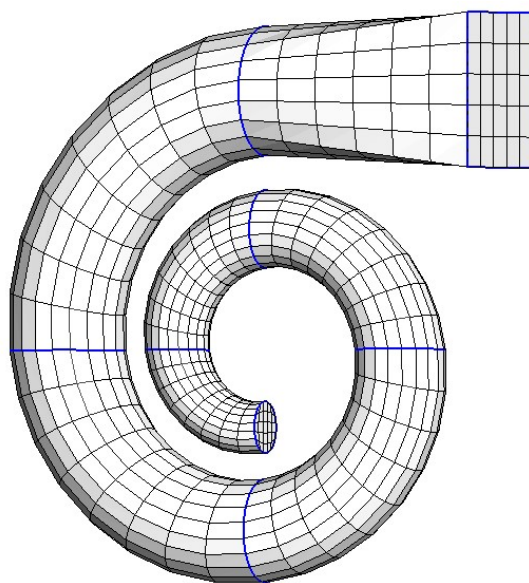


Рис. 4. Построение геометрии и сетки спиралевидной трубы переменного диаметра по сечениям

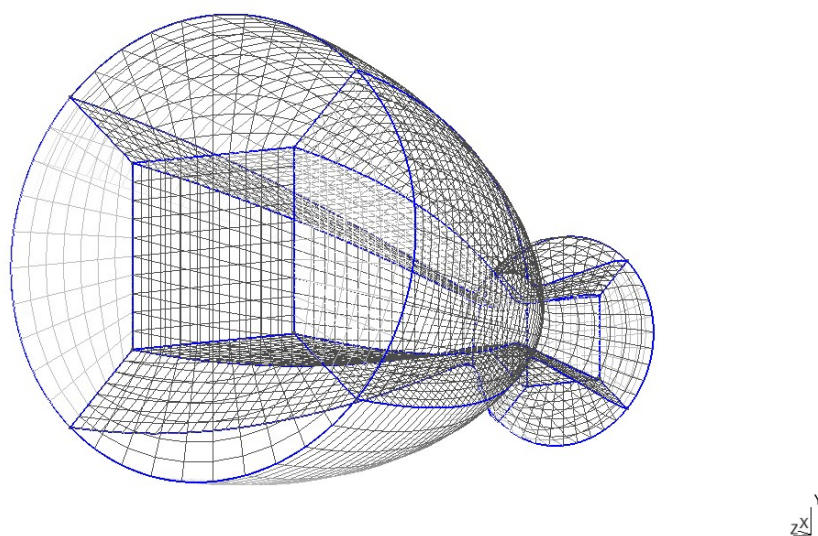
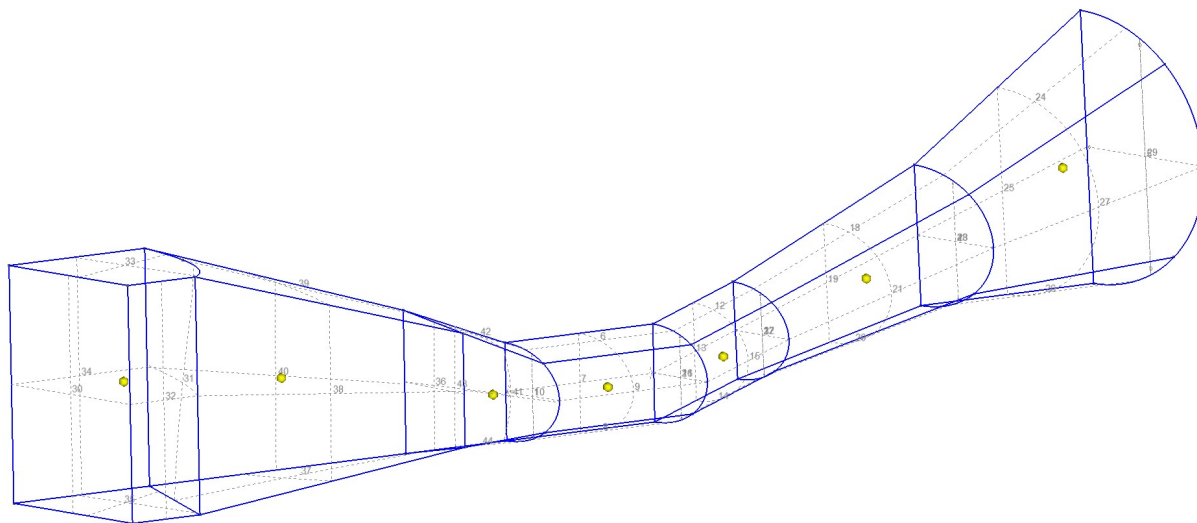


Рис. 5. Построение геометрии и сетки в круговом сопле выталкиванием по углу и заданием трансфинитных поверхностей и объемов

3. Алгоритм построения многоблочных структурированных сеток в Gmsh

Процесс построения гексаэдральной сетки методом разбиения расчетной области на подобласти гексаэдральной формы начинался с определения ключевых точек в «.geo» скрипт-файле, которые служили основой для построения геометрических объектов. Каждая точка идентифицировалась уникальным целочисленным тегом, и ее координаты задавались непосредственно в скрипте. Затем, на основе этих точек, формировались граничные кривые с использованием команд, соответствующих типу геометрии: линейные сегменты (Line), эллиптические дуги (Ellipse) или сплайновые кривые (Spline, BSpline). На рис. 6, а представлен пример такого геометрического каркаса.

а)



б)

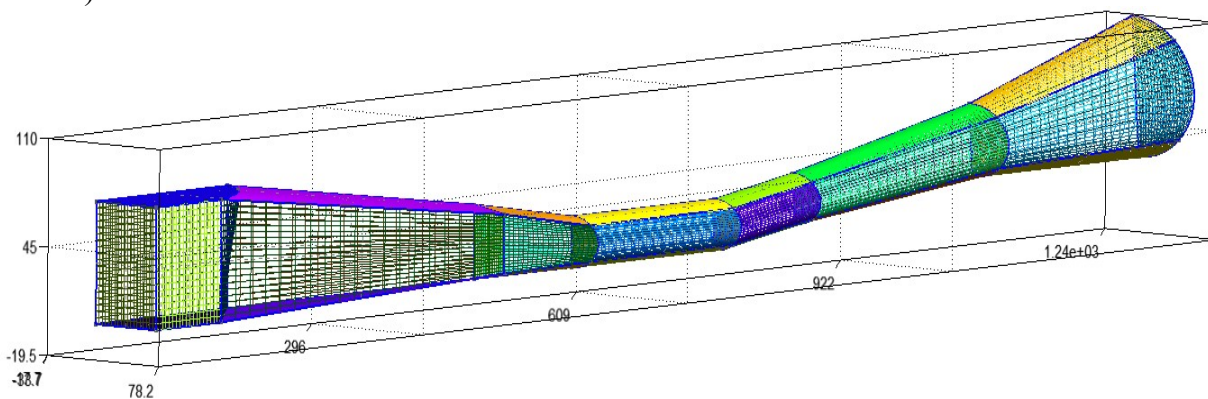


Рис. 6. Построение геометрии и сетки в круговом сопле выталкиванием по углу и заданием трансфинитных поверхностей и объемов

После создания всех необходимых кривых, они объединялись для формирования поверхностей с помощью команды *Surface*. Для построения замкнутых объемов в трехмерном пространстве (или областей в двумерном случае) применялась команда *Volume*, которая объединяла граничные поверхности. Геометрическая модель для данного исследования была предварительно декомпозирована на несколько логических блоков, где каждый блок представлял собой отдельный *Volume* (или *Surface*). Этот этап критически важен для обеспечения структурированности сетки и точного контроля над качеством ячеек в различных частях расчетной области. Выбор такой блочной структуры, ориентированной на топологически простые формы, позволил максимизировать эффективность последующей генерации структурированных сеток.

Следующим ключевым этапом стала генерация структурированной сетки, для чего применялся алгоритм трансфинитной генерации. Этот метод обеспечивает точную дискретизацию, особенно в областях с предполагаемыми интенсивными градиентами физических полей, таких как приграничные слои. Сначала, для каждой граничной кривой блока, определялось распределение узлов и их количество с помощью функции *Transfinite Curve*. Параметры этой функции, такие как арифметическая или геометрическая прогрессия, позволяли задать требуемое сгущение сетки к определенным точкам или поверхностям, что демонстрируется в двумерном канале с каверной на рис. 7.

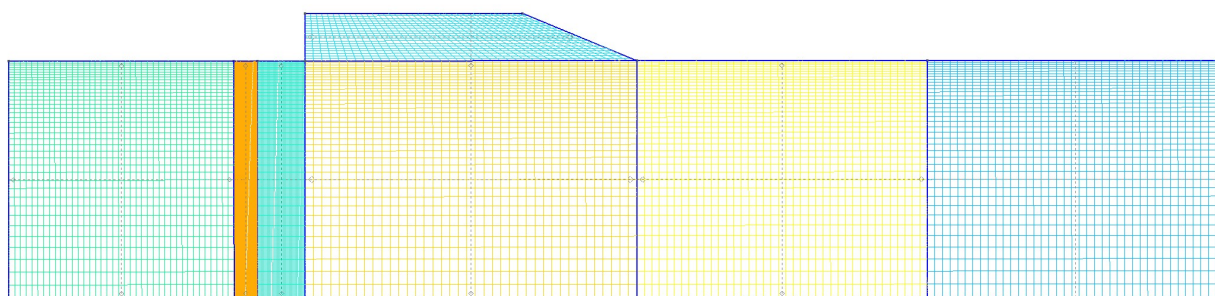


Рис. 7. Построение геометрии и сетки в круговом сопле выталкиванием по углу и заданием трансфинитных поверхностей и объемов [7]

После задания одномерной сетки на всех границах поверхностей, двумерная сетка внутри каждой поверхности генерировалась командой *Transfinite Surface*. Эта команда использовала информацию о трансфинитной дискретизации граничных кривых для построения структурированной сетки, состоящей из квадрантных элементов. Для трехмерных объемов, аналогично, команда *Transfinite Volume* использовалась для построения структурированной сетки из гексаэдрических элементов, базируясь на трансфинитной дискретизации граничных поверхностей. В ряде случаев, для оптимизации структуры сетки и получения качественных гексаэдрических элементов, применялась команда *Recombine Surface*, объединяющая смежные граничные кривые и создающая более регулярную сетку. Итоговая трехмерная многоблочная структурированная сетка, полученная после применения этих команд, представлена на рис. 6, б.

После генерации сеток для всех блоков, файл «.geo» сохранялся, и с использованием *Gmsh* производилась полная генерация сетки. Далее, сетка экспортировалась в промежуточном формате «.p3d» для дальнейшей обработки.

Для последующего анализа и проведения численных расчетов, сетка конвертировалась в формат, совместимый с используемым решателем и постпроцессором *Tecplot*. Этот процесс включал открытие «.p3d» файла в *Tecplot*, выбор опции *File* → *Write Data*, а затем выбор формата сохранения *ASCII Data Writer*. Для сохранения информации о сетке выбирался формат “Point”, который определяет каждую ячейку через координаты ее узлов. Этот шаг позволил сохранить сетку в удобном для последующего анализа формате, содержащем точную информацию о координатах узлов и топологии ячеек, что является необходимым условием для корректного проведения численных расчетов.

4. Примеры расчета

С помощью описанной технологии строились двумерные [5–8] и трехмерные [9–11] расчетные сетки. Для численного моделирования использовалась авторская компьютерная программа [9–14], которая реализует численное интегрирование системы уравнений механики вязкого теплопроводного химического реагирующего газа в двумерной постановке. Математическая модель подобно описана в работах [9, 15–19].

Пример использования двумерной сетки построенной с помощью представленной методологии был показан в работах [7, 8]. На рис. 8 показан процесс колебаний в каверне L4A90. В начальный момент времени в каверне L4A90 возникает неустойчивость течения, обусловленная разницей скоростей потока в каверне и основном потоке. Как видно на рис. 8, а, в результате этой неустойчивости формируется волна, которая в определенный момент времени достигает задней стенки каверны. При этом наблюдается локальное повышение давления и плотности. Затем это возмущение распространяется внутри каверны против основного потока (рис. 8, б). Достигнув передней стенки, возмущение вызывает локальное повышение давления и истечение массы из каверны. Это, в свою очередь, приводит к

отклонению основного потока. Описанный процесс повторяется циклически и представляет собой расходные колебания.

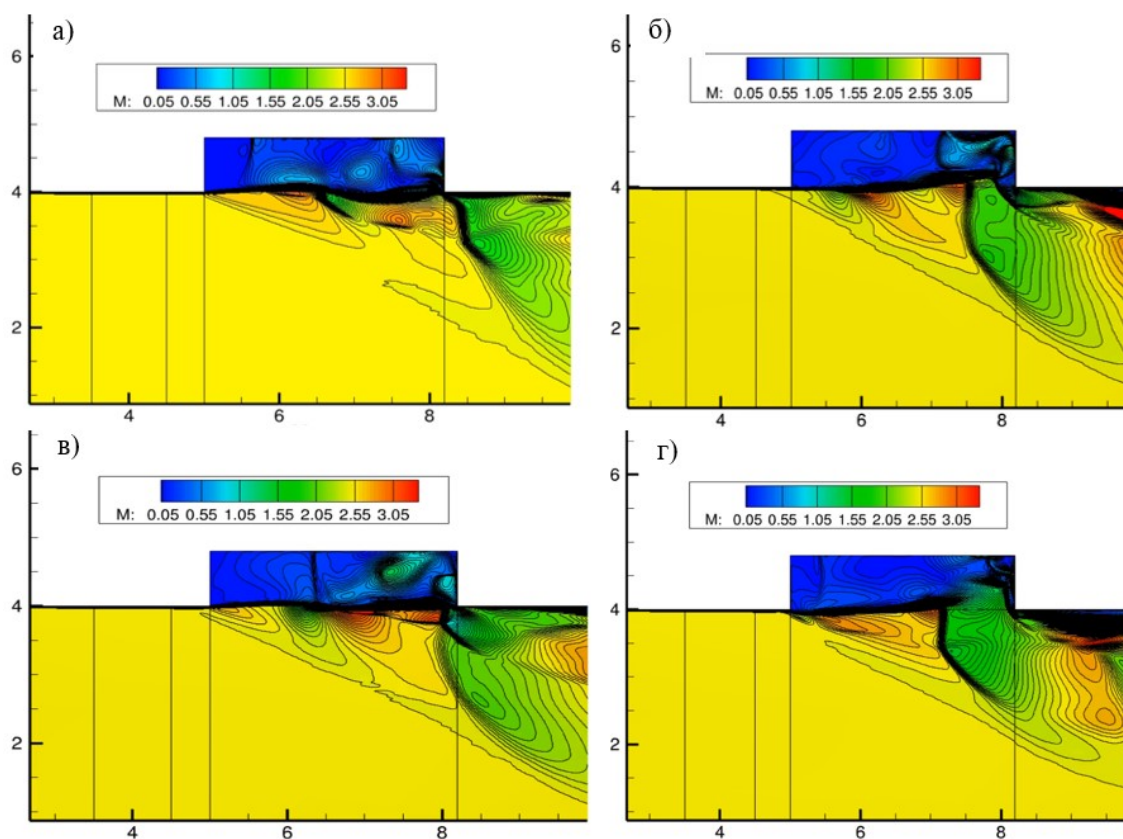


Рис. 8. Рассчитанное распределение числа Маха в канале с каверной L4A90 в различные моменты времени [7]

Для демонстрации использования описанной в настоящей работе методики построения трехмерных сеток была выбрана экспериментальная установка для исследования процессов высокоскоростного горения, разработанная и испытанная в Университете Квинсленда [20]. Установка была специально спроектирована для изучения рабочих процессов в прямоточном воздушно-реактивном двигателе при условиях, соответствующих расчётному числу Маха полёта $M=8$ на высоте порядка 30 км.

Экспериментальная модель (рис. 9) включала следующие основные элементы: переднюю плиту, воздухозаборник типа rectangular-to-elliptical shape transition (REST), систему впрыска топлива, эллиптическую камеру сгорания и выходное сопло. Испытания проводились в конфигурации полусвободной струи, что позволяло адекватно воспроизводить условия набегающего потока на входе в двигатель и минимизировать влияние стенок экспериментальной установки на структуру течения.

В экспериментах были реализованы следующие параметры набегающего потока: число Маха $M=6.6$, статическое давление 2630 Па, плотность 0.027 кг/м^3 , статическая температура 340 К и скорость потока 2448 м/с. Воздухозаборник REST характеризовался общим коэффициентом сжатия 5.80 и внутренним коэффициентом сжатия 2.08. Конструкция воздухозаборника включала изолятор постоянного сечения, предназначенный для изоляции камеры сгорания от противодавления и стабилизации положения отражённых ударных волн в тракте двигателя.

Для регистрации параметров течения воздухозаборник был оснащён одиннадцатью датчиками статического давления, установленными вдоль осевой линии на стенке корпуса.

Это позволяло детально отслеживать эволюцию давления и структуру ударно-волновых взаимодействий на входном участке двигателя.

Эллиптическая камера сгорания имела входную высоту около 30.1 мм и общую длину порядка 305.4 мм, что соответствует отношению длины к высоте приблизительно 10. Для выравнивания течения на входе в камеру был предусмотрен излом проточной части под углом 6° . Система впрыска топлива располагалась в начальной части камеры сгорания, на участке длиной 30 мм непосредственно за входным изломом. Впрыск осуществлялся через эллиптическое инжекторное кольцо с восемью отверстиями диаметром 1.9 мм, ориентированными под углом 45° к направлению основного потока. Инжекторы были установлены заподлицо со стенкой камеры с целью минимизации аэродинамических потерь и возмущений течения.

Выходное сопло оснащалось восемью датчиками статического давления, размещёнными вдоль осевой линии на стенках корпуса и центрального обтекателя, что обеспечивало контроль распределения давления в выходной части проточного тракта.

Описанная экспериментальная установка послужила основой для отработки технологии построения трехмерных структурированных сеток и позволила провести корректное сопоставление расчётных и экспериментальных данных по распределениям давления и характеристикам течения в проточном тракте двигателя как в отсутствии впрыска топлива, так и при реализации различных режимов горения. При создании цифрового образа (см. рис. 6, б) экспериментальной установки геометрия боковых стенок воздухозаборника была несколько упрощена. В итоге была использована трехмерная семиблочная структурированная сетка различной степени подробности (7000, 56 000, 480 000 и 33 584 000 элементов).

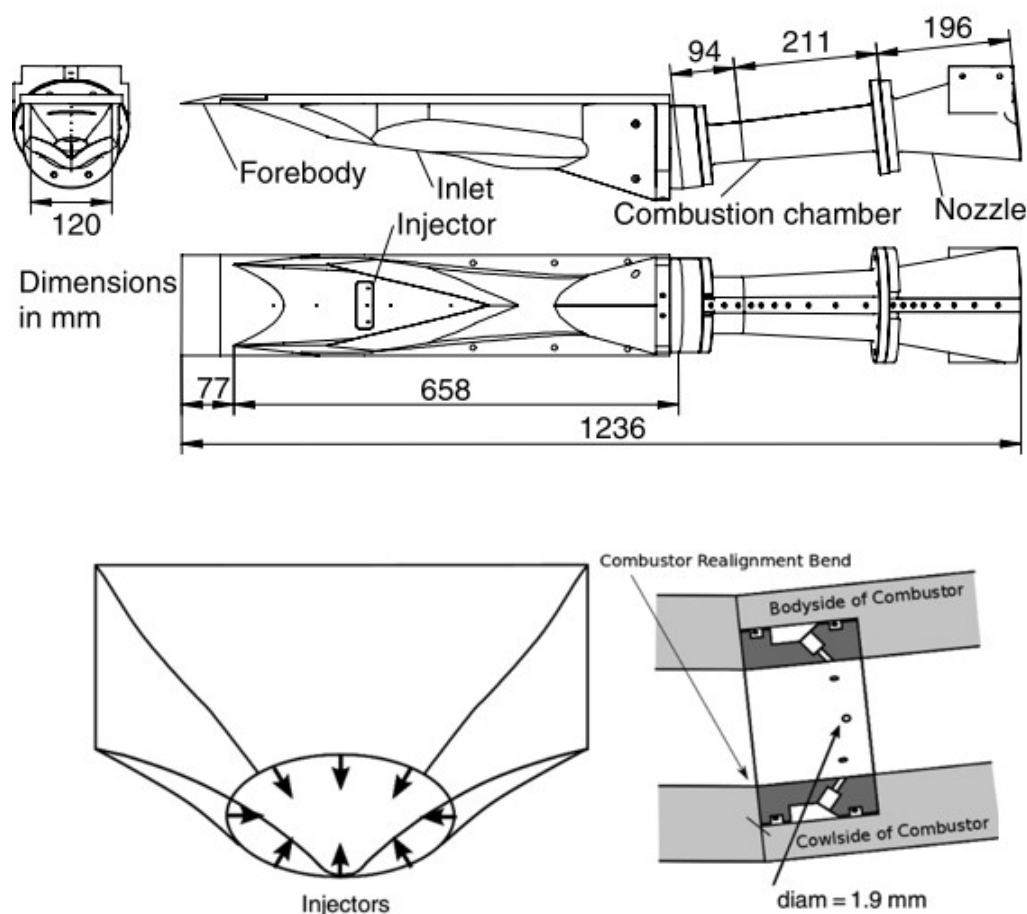


Рис. 9. Схема и метод подачи топлива экспериментальной установки Университета Квинсленда. Рисунок взят из работы [20]

Все расчёты с горением были выполнены на семиблочной вычислительной сетке с числом ячеек $40 \times 40 \times 40$ в каждом блоке. Численное моделирование проведено для различных значений коэффициента избытка воздуха, при этом наиболее подробно исследованы режимы с коэффициентами избытка воздуха $\varphi = 0.67$ и $\varphi = 0.98$, для которых наблюдаются принципиально различные картины течения и горения.

На рис. 10 представлено распределение безразмерного давления на верхней стенке канала при коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$. Численные результаты демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными в ключевых областях течения. В частности, корректно воспроизводится падение давления при $x \approx 563$ мм, обусловленное формированием волны разрежения на верхней стенке в начале изолятора. Далее область монотонного повышения давления в интервале $x = 600 \div 700$ мм хорошо совпадает с экспериментом, при этом величина давления достигает $p/p_0 \approx 15$.

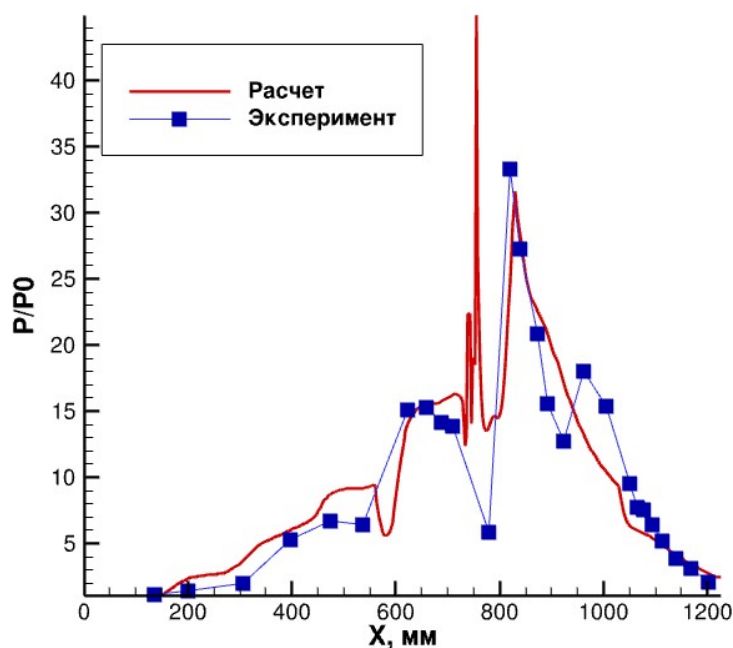


Рис. 10. Распределение безразмерного давления p/p_0 на верхней стенке канала при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$; сравнение с экспериментальными данными [20]

В области вдува топлива ($x \approx 735$ мм) наблюдается резкий рост давления, а при $x \approx 830$ мм формируется выраженный пик давления, совпадающий с экспериментальными данными как по амплитуде, так и по положению ($p/p_0 \approx 32$). Последующие пики давления, зафиксированные в эксперименте, в расчётах воспроизвести не удалось, что, по-видимому, связано с упрощением геометрии воздухозаборника и, как следствие, с искажением пространственной структуры отражённых ударных волн.

На рис. 11–13 представлены распределения температуры, числа Маха и концентрации кислорода в различных сечениях Оху при значениях индекса сетки $K = 10, 20, 30, 40$, где $K = 40$ соответствует оси симметрии канала. Видно, что основное тепловыделение и активное горение начинаются в области вдува топлива, при этом температура достигает значений порядка 4000 К. В сечении, наиболее близком к боковой стенке ($K = 10$), зона активного горения располагается ближе к середине камеры сгорания, что связано с расположением одного из отверстий подачи топлива в данной области. Более интенсивное горение наблюдается вблизи верхней стенки.

Формирование дозвуковых зон (выделенных белым цветом на рис. 12) имеет локальный характер: они возникают преимущественно вблизи верхней стенки сразу после области вдува топлива и имеют ограниченные размеры. В изоляторе до зоны подачи топлива горение практически отсутствует, а течение остаётся преимущественно сверхзвуковым.

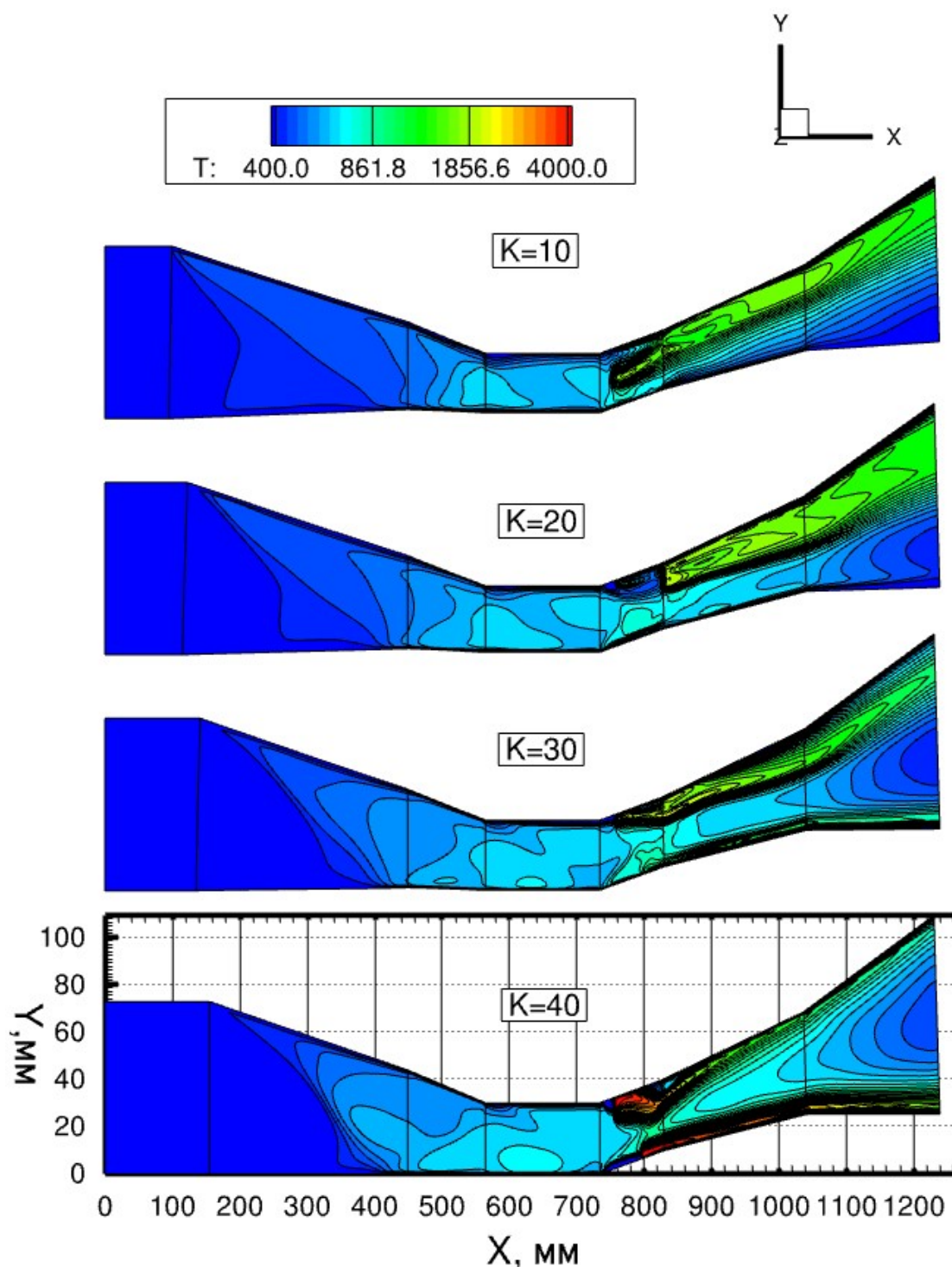


Рис. 11. Распределение температуры в различных сечениях Оху при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$ ($K = 10, 20, 30, 40$)

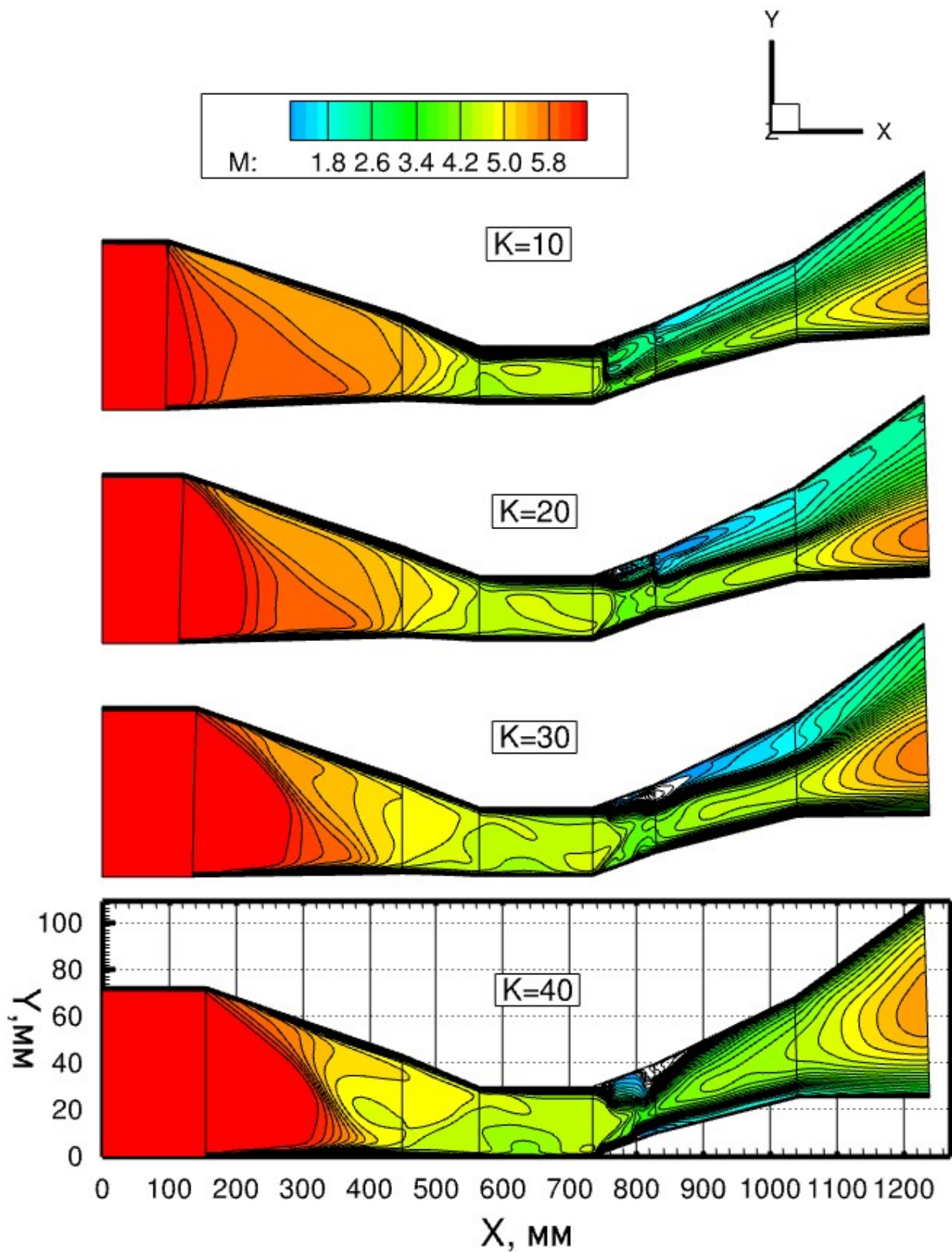


Рис. 12. Распределение числа Маха в различных сечениях Oxy при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi=0.67$ ($K=10, 20, 30, 40$)

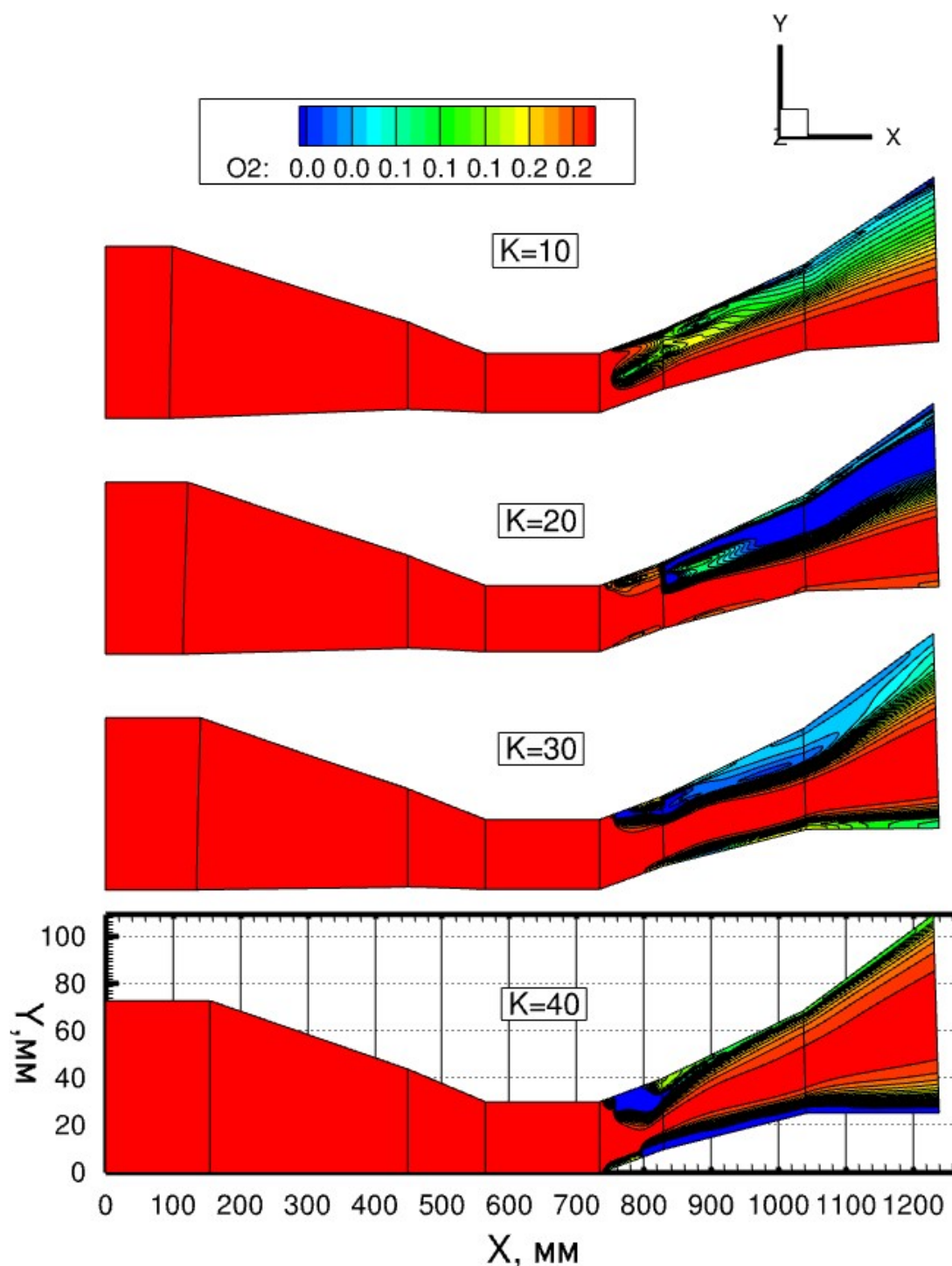


Рис. 13. Распределение массовой доли кислорода в различных сечениях Ox при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi=0.67$ ($K=10, 20, 30, 40$)

Распределения температуры, числа Маха и концентрации кислорода в различных сечениях Ox при $x=600, 650, 800, 850, 900, 950, 1000$ и 1136 мм приведены на рис. 14–16. Из анализа данных видно, что активное горение развивается в области смешения струй водорода с набегающим воздушным потоком. Основной вклад в тепловыделение вносят струи топлива, подаваемые с верхней стенки, а также струя, расположенная на оси симметрии нижней стенки. В изоляторе горение отсутствует. Дозвуковые зоны имеют ограниченный размер и в основном локализованы вблизи верхней стенки; небольшая дозвуковая область также наблюдается при $x \approx 800$ мм на оси симметрии нижней стенки.

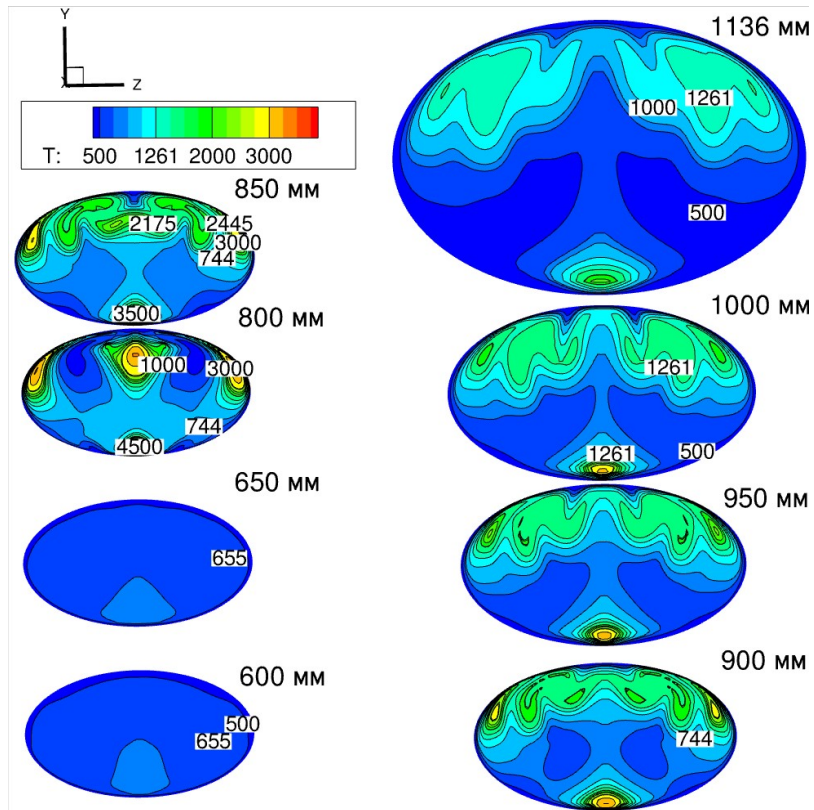


Рис. 14. Распределение температуры в различных сечениях Оуз при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$ ($x = 600, 650, 800, 850, 900, 950, 1000$ и 1136 мм)

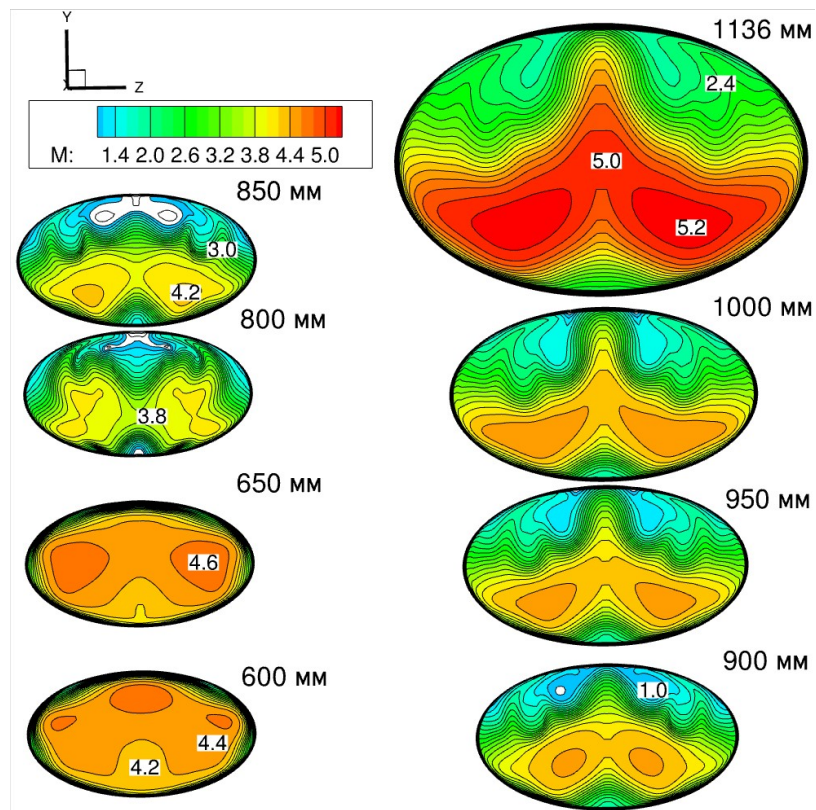


Рис. 15. Распределение числа Маха в различных сечениях Оуз при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$ ($x = 600, 650, 800, 850, 900, 950, 1000$ и 1136 мм)

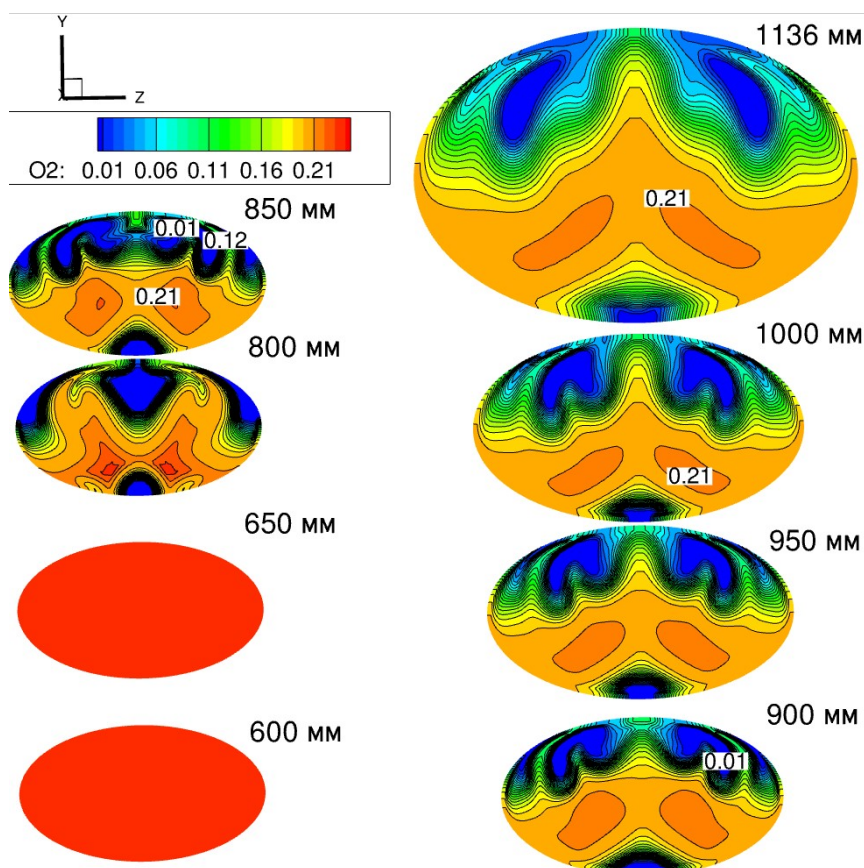


Рис. 16. Распределение массовой доли кислорода в различных сечениях Оуэ при горении и коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$ ($x = 600, 650, 800, 850, 900, 950, 1000$ и 1136 мм)

На рис.17 представлена трёхмерная картина изоповерхностей температуры $T = 1500$ К, наглядно демонстрирующая пространственные области, в которых происходит горение при данном режиме работы двигателя.

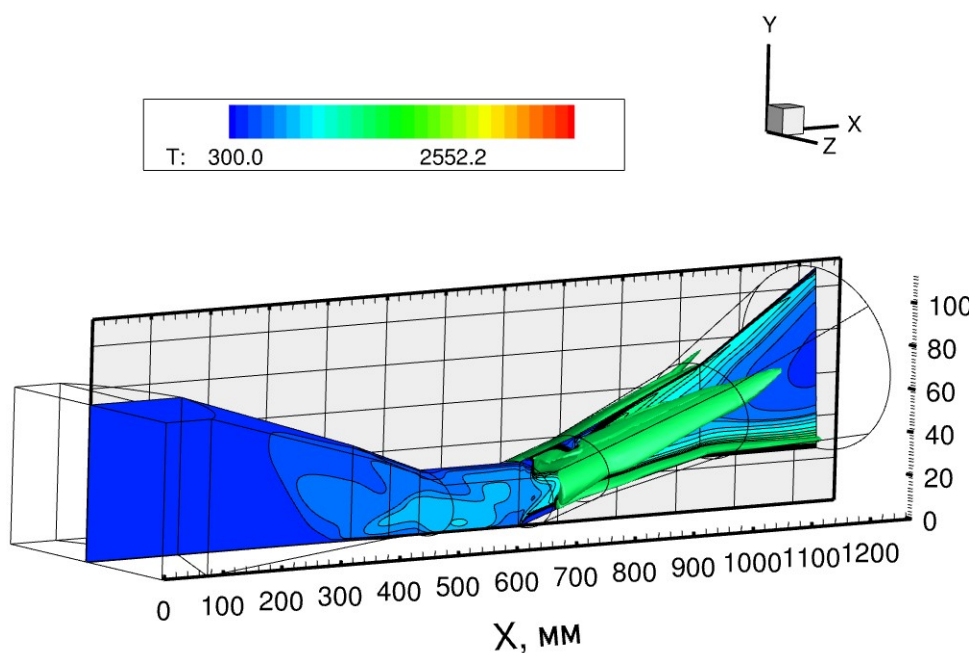


Рис. 17. Трёхмерные изоповерхности температуры $T = 1500$ К, иллюстрирующие пространственные области активного горения при коэффициенте избытка воздуха $\varphi = 0.67$

5. Заключение

В работе разработана и апробирована методика построения многоблочных структурированных сеток в Gmsh для моделирования термогазодинамических процессов в камерах сгорания сложной геометрии. Предложенный подход к декомпозиции расчётной области на топологически простые блоки с трансфинитной генерацией сетки обеспечивает высокое качество гексаэдрических элементов и контролируемое сгущение в зонах градиентов.

Методика отличается простотой реализации в открытом ПО, масштабируемостью и применимостью к широкому диапазону режимов без перестройки блоковой структуры, что делает её эффективным инструментом для высокоточных CFD-расчётов в задачах механики жидкости и газа.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500440-9).

Литература

1. Geuzaine C., Remacle J.F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in preand post-processing facilities // *Int. J. Numer. Methods Engineering*. 2009. Vol. 79. No. 11. Pp. 1309–1331.
2. Marot C., Pellerin J., Remacle J.F. One machine, one minute, three billion tetrahedra // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2019. Vol. 117, No. 9. Pp. 967–990. DOI: 10.1002/nme.5987
3. Ермаков М.К., Крючкова А.С. Генерация неструктурированных тетраэдральных сеток для обтекания летательных аппаратов на основе открытых пакетов // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2020. Т. 21, вып. 2. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2020-21-2/articles/897/>
4. Ермаков М.К. Генерация тетраэдральных сеток для суперкомпьютерного моделирования обтекания аэрокосмических объектов // *Вычислительные методы и программирование*. 2020. Т. 21, вып. 4. С. 341–349. <https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r429>
5. Селезнев Р.К., Суржиков С.Т. Нестационарные газодинамические процессы в прямоугольном канале ГПВРД с периодическим вдувом холодного воздуха // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2015. Т. 16, вып. 3. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2015-16-3/articles/495/>
6. Seleznev R.K. Numerical study of the flow structure in the supersonic inlet-isolator with mechanical throttle // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. Vol. 1250, № 1. Pp. 2–6.
7. Селезнев Р.К. Исследование колебаний в сверхзвуковом канале с каверной // *Изв. РАН. МЖГ*. 2025. № 4. С. 50–65.
8. Селезнев Р.К. Анализ структуры течения в сверхзвуковом канале с каверной // *Изв. РАН. МЖГ*. 2024. № 1. С. 83–90.
9. Seleznev R.K. Numerical study of the flow structure in the supersonic inlet-isolator // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1009. Art. 012034.
10. Seleznev R.K. Validation of 3D model by the example of a supersonic inlet-isolator // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1009. Art. 012031.
11. Селезнев Р.К. Численное исследование ПВРД и ГПВРД режимов работы камеры сгорания HIFiRE-2 // *Изв. РАН. МЖГ*. 2022. № 6. С. 64–73.
12. Seleznev R.K. Validation of two-dimensional model by the example of a supersonic inlet-isolator // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1009. Art. 012030.
13. Surzhikov S.T., et al. Unsteady Thermo-Gasdynamic Processes in Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air // *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. DOI:10.2514/6.2014-3917

14. Селезнев Р.К. Исследование структуры течения в модельном воздухозаборнике ГПВРД с поперечной подачей водородного топлива в сверхзвуковой поток // Изв. РАН. МЖГ. 2021. № 3. С. 30–38.
15. Суржиков С.Т. Термогазодинамика модельной камеры сгорания этилена в сверхзвуковом потоке // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 3. С. 115–134.
16. Суржиков С.Т. Аэрофизика обтекания затупленного клина конечных размеров // Известия Российской Академии Наук. МЖГ. 2021. № 5. С. 89–102.
17. Суржиков С.Т. Теплообмен и ионизация при неравновесном обтекании затупленной пластины гиперзвуковым потоком // Известия Российской Академии Наук. МЖГ. 2021. № 6. С. 109–124.
18. Суржиков С.Т. О двухмерном численном моделировании экспериментальных данных Берроуса – Куркова по горению водорода в сверхзвуковом потоке воздуха с использованием уравнений Навье – Стокса // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 4. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2021-22-4/articles/957/>
19. Суржиков С.Т. Результаты использования алгебраических моделей турбулентности в рамках RANS модели нагрева поверхности острой пластины в сверхзвуковом потоке // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24, вып. 3. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2023-24-3/articles/1056/>
20. Turner J.C., Smart M.K. Mode change characteristics of a three-dimensional scramjet at mach 8 // J. Propuls. Power. 2013. Vol. 29. No. 4. Pp. 982–990. DOI:10.2514/1.B34569

Reference

1. Geuzaine C., Remacle J.-F., Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331.
2. Marot C., Pellerin J., Remacle J.-F., One machine, one minute, three billion tetrahedra, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2019, vol. 117, no. 9, pp. 967–990. DOI: 10.1002/nme.5987
3. Ermakov M. K., Kryuchkova A. S., Generation of unstructured tetrahedral meshes for flow past flight vehicles based on open packages, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, vol. 21, iss. 2 [in Russian].
4. Ermakov M. K., Tetrahedral grid generation for supercomputer modeling of flow past aerospace objects, *Numerical Methods and Programming*, 2020, vol. 21, pp. 341–349 [in Russian].
5. Seleznev R. K., Surzhikov S. T., Unsteady gas-dynamic processes in a rectangular scramjet channel with periodic input of cold air, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, iss. 3 [in Russian].
6. Seleznev R. K., Numerical study of the flow structure in the supersonic inlet-isolator with mechanical throttle, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1250, no. 1, art. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1250/1/012034
7. Seleznev R. K., Investigation of oscillations in a supersonic channel with a cavity, *Fluid Dynamics*, 2025, vol. 60, no. 4, pp. 50–65.
8. Seleznev R. K., Analysis of the flow structure in a supersonic channel with a cavity, *Fluid Dynamics*, 2024, vol. 59, no. 1, pp. 83–90.
9. Seleznev R. K., Numerical study of the flow structure in the supersonic inlet-isolator, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1009, art. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1009/1/012034
10. Seleznev R. K., Validation of 3D model by the example of a supersonic inlet-isolator, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1009, art. 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1009/1/012031

11. Seleznev R. K., Numerical Investigation of Ramjet and Scramjet Operation Modes of the HIFiRE-2 Combustion Chamber, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 6, pp. 758–767. DOI: 10.1134/s0015462822600382
12. Seleznev R. K., Validation of two-dimensional model by the example of a supersonic inlet-isolator, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1009, art. 012030. DOI: 10.1088/1742-6596/1009/1/012030
13. Surzhikov S. T., et al., Unsteady Thermo-Gasdynamics Processes in Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air, *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. DOI: 10.2514/6.2014-3917
14. Seleznev R. K., Investigation of the flow structure in a model scramjet inlet with transverse hydrogen fuel injection into a supersonic flow, *Fluid Dynamics*, 2021, vol. 56, no. 3, pp. 30–38. DOI: 10.1134/s0568528121030087
15. Surzhikov S. T., Thermogasdynamics of a model ethylene combustion chamber in a supersonic flow, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 3, pp. 115–134.
16. Surzhikov S. T., Aerophysics of blunted wedge finite-size flow, *Fluid Dynamics*, 2021, vol. 56, no. 5, pp. 89–102.
17. Surzhikov S. T., Heat transfer and ionization during non-equilibrium hypersonic flow over a blunted plate, *Fluid Dynamics*, 2021, vol. 56, no. 6, pp. 109–124. DOI: 10.31857/S0568528121060153
18. Surzhikov S. T., On two-dimensional numerical modeling of the Burrows–Kurkov experimental data on hydrogen combustion in a supersonic air flow using NS/RANS equations, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, iss. 4 [in Russian].
19. Surzhikov S. T., Results of the Use of Algebraic Models of Turbulence in the Framework of the RANS Model of Heating the Surface of a Sharp Plate in a Supersonic Flow, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 3 [in Russian].
20. Turner J. C., Smart M. K., Mode change characteristics of a three-dimensional scramjet at Mach 8, *Journal of Propulsion and Power*, 2013, vol. 29, no. 4, pp. 982–990. DOI:10.2514/1.B34569

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2026 г.