

нием катализатора, например мелкодисперсного кварцевого порошка субмикронного размера.

ПВР оснащен комплексом высокоточной современной диагностической аппаратуры, включающей: водяной и газовый калориметры, расходомеры, оптическую интерферометрию для бесконтактного измерения поля температур в потоке, PIV для измерения поля скоростей, зонды для измерения параметров электрического разряда (ток, напряжение, вложенная в разряд мощность); систему измерения потенциала в области разряда электрическими зондами; масс-спектроскопию и изотопный анализ выходных продуктов из ПВР; оптическую спектроскопию; диагностики ультрафиолетового, мягкого рентгеновского излучения и высокоэнергетических электронов.

После пробоя газа в ПВР достаточно быстро устанавливается некоторое квазиравновесное состояние. Температура разряда в рабочей зоне на оси вихря достигает значений порядка 2000–3000°C. В результате различных процессов в камере образуется водород, который в результате вихревой сепарации концентрируется на оси разряда — наиболее горячей области рабочей зоны. Разнообразные измерения в многочисленных экспериментах с различными составами газовой смеси, параметрами вихря, геометрией ПВР, способами создания разряда показали, что в зависимости от состава газа и особенностей его движения отношение выделенной мощности к вложенной может достигать шести.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Гидродинамические процессы внутри ПВР можно описать с помощью трехмерной модели. Постановка математической задачи основана на уравнениях динамики вязкого ньютоновского теплопроводного газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0; \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes (\rho \mathbf{u})) + \nabla p &= \nabla \cdot \Pi; \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(E + p)) &= Q + \nabla \cdot \mathbf{G} + \nabla(\Pi \cdot \mathbf{u}); \\ E &= \frac{1}{2} \rho \mathbf{u}^2 + \rho e; \\ p &= \rho R T; \quad \mathbf{G} = k \nabla T; \\ \Pi_{ij} &= \mu (\partial_i u_j + \partial_j u_i - \frac{2}{3} \partial_k u_k \delta_{ij}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность газа, \mathbf{u} — вектор скорости, T — температура, p — давление, E — плотность полной энергии, e — плотность внутренней энергии, Q — плотность источника тепла, \mathbf{G} — плотность источ-

ника теплопроводности, Π — ньютоновский тензор вязких деформаций. Данная система уравнений дополнена соответствующими начальными и граничными условиями.

В связи со сложной геометрией области расчета применяется неструктурированная гетерогенная сетка, состоящая из тетраэдров и призм. Консервативная схема для системы (1) строится с помощью рассмотрения невязких и вязких потоков на гранях элементов разбиения области и их суммировании. Схема имеет второй порядок аппроксимации по пространству и по времени. Матрица консервативного оператора приводится к квазидиагональному виду методом RCM + ICC из кода OpenFVM. Локальная задача Римана при рассмотрении невязких потоков решается методом HLLC [12]. Турбулентный тепломассообмен учитывается методом больших вихрей с динамической моделью подсеточной турбулентной вязкости.

Программное обеспечение протестировано на классических задачах Сола, задачах обтекания профилей NACA 0012, ONERA M6 и RAE (см. [13]), и позволяет достаточно хорошо описывать газодинамические процессы в ПВР. Реализована возможность вычислений на кластере с архитектурой GPGPU (графические процессоры NVIDIA, язык CUDA), что заметно ускоряет расчеты и увеличивает точность результатов.

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ТЕПЛА. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В модели ПВР (1) эффект выделения энергии описывает источник тепла $Q = Q_{\text{known}}(t, \mathbf{r}) + Q_{\text{anomal}}(t, \mathbf{r})$, где $Q_{\text{known}}(t, \mathbf{r})$ — суммарная мощность тепловыделения (включая теплопоглощение) всех известных физических и химических процессов, в том числе нагрев электрическим током и химическими реакциями, $Q_{\text{anomal}}(t, \mathbf{r})$ — мощность аномального тепловыделения. Коэффициент усиления вложенной в установку мощности $Q_{\text{input}}(t)$ определяется интегралом по объему реакторной области V разряда: $K = \frac{\int_V Q(t, \mathbf{r}) d\mathbf{r}}{Q_{\text{input}}(t)}$.

Всесторонние экспериментальные исследования, исчерпывающие измерения с помощью различных диагностик, многочисленные вычислительные эксперименты показывают, что аномальное высокое выделение тепла масштаба десятков эВ на частицу не удается объяснить известными физическими процессами или известными химическими реакциями, имеющими выход масштаба нескольких эВ на частицу. Специальные эксперименты с чистым азотом обосновывают малый вклад продуктов эрозии электродов в тепловой