

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

© 2012 г. К. Ю. Нагулин, канд. физ.-мат. наук; Р. И. Ибрагимов; И. В. Цивильский;

А. Х. Гильмутдинов, доктор физ.-мат. наук

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: Knagulin@mail.ru

Разработан диагностический комплекс для моделирования и экспериментального исследования газодинамических и спектральных характеристик индуктивно-связанной плазмы. В состав комплекса входят четырехмерная компьютерная модель плазмы, исследовательский плазменный генератор, шлирен-система для визуализации пространственной структуры газовых потоков в горелке и спектрометр высокого разрешения для получения информации о температуре в зоне разряда по интенсивности эмиссионных спектров.

Модель адекватно отображает динамику газовых потоков в горелке без поджига разряда индуктивно-связанной плазмы. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** индуктивно-связанная плазма, вычислительная газовая динамика, эмиссионная спектроскопия, оптический шлирен-метод.

Коды OCIS: 350.5400 000.4430 300.6210

Поступила в редакцию 25.05.2011

## Введение

Благодаря исключительной чистоте, стабильности и высокой температуре индуктивно-связанная плазма (ИСП) широко применяется в аналитической спектрометрии, а также в промышленности в качестве плазмохимического реактора (синтез сверхчистых наноструктурных порошков) и источника нагрева (сфериодизация частиц, нанесение покрытий, рост кристаллов) [1]. Поскольку ключевые аналитические характеристики плазмы непосредственно зависят от ее параметров и стабильности, то потенциал дальнейшего развития спектрохимического анализа с ИСП в значительной степени связан с улучшением характеристик плазменной горелки. Параметры плазмы зависят от множества разнородных и одинаково важных факторов: газовых потоков, геометрии горелки, формы катушки индуктора, подаваемой мощности, частоты высокочастотного (ВЧ) поля и проч. В таких условиях любая оптимизация, основанная на эмпирическом методе “проб и ошибок”, является чрезвычайно труд-

ной. В этой связи представляется актуальной задача по разработке комплекса для моделирования и экспериментальной апробации ключевых газодинамических и спектральных характеристик ИСП. Подобный комплекс может быть использован в качестве “виртуальной горелки” для более быстрой и корректной оптимизации уже существующих устройств с ИСП и при разработке принципиально новых горелок.

## Модель горелки для ИСП

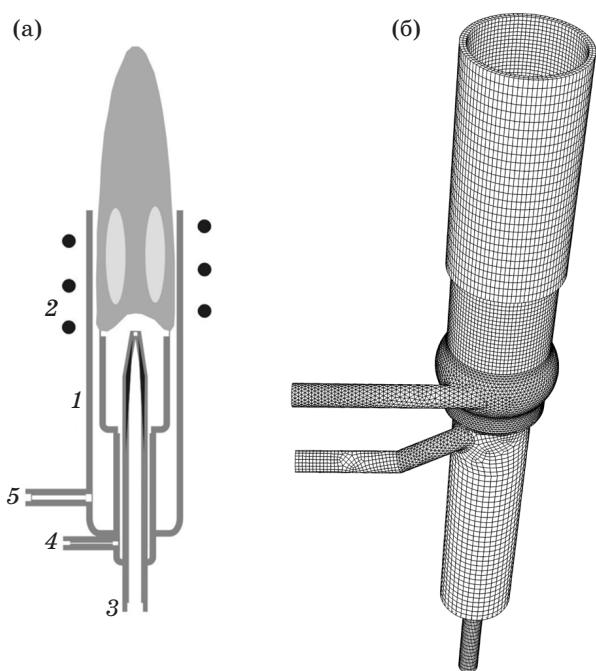
Наиболее совершенные из существующих моделей [2–5] учитывают все физические процессы в плазме, однако всем им присущи следующие принципиальные ограничения:

- Даже лучшие модели основаны на предложении осевой симметрии плазмы (учитываются только осевые и радиальные зависимости параметров плазмы).
- Плазма предполагается стационарной.
- При расчетах рассматривается только сама плазма, а поток газа до плазмы и после нее не принимаются во внимание.

В то же самое время прямые эксперименты указывают на вращение индуктивно-связанной плазмы фактически при всех эксплуатационных режимах [6, 7], сопровождающееся ее пульсацией [6, 8]. Это означает, что третья пространственная координата задачи – вихревая компонента, также является важной, а плазменная пульсация добавляет к проблеме временное измерение.

Таким образом, с точки зрения фундаментального описания, индуктивно-связанная плазма представляет собой четырехмерную задачу (три пространственных координаты и время), для которой до сих пор разработаны только двухмерные модели. Это является ключевой причиной, почему существующие модели, чрезвычайно полезные в интерпретации многих экспериментальных наблюдений, не в состоянии предсказать принципиально новые пути оптимизации плазменной горелки и режимов ее работы.

В качестве конкретного объекта моделирования использована стандартная спектроаналитическая горелка Фассела от масс-спектрометра с ИСП *Elan DRC-II* (Перкин Элмер, США) (рис. 1а). Она является типичной для аналитической спектрометрии и все полученные результаты могут быть также использованы для других существующих модификаций горелки этого типа. Горелка представляет собой три коаксиальных кварцевых цилиндра. Внутренний цилиндр имеет радиус порядка 1–2 мм и служит для ввода исследуемого образца в плазму. В пространство между внешним и промежуточными цилиндрами вводится “внешний” или “охлаждающий” поток газа. Его задача – предотвратить перегрев и плавление внешних стенок горелки. Поток, вводимый в пространство между средним и внутренним цилиндрами, носит название “промежуточного” и служит для управления положением пламенного факела. На трех вводах поддерживается постоянные массовые расходы газа, обычно составляющие 1, 1 и 15 л/мин на внутреннем, промежуточном и внешнем потоках соответственно. Эти параметры могут меняться в зависимости от конфигурации, вида исследуемых образцов и поставленных целей, однако эти изменения незначительны и приблизительно количественное соотношение между потоками сохраняется. Вводы газа в горелку выполнены по касательной к основным цилиндрам, за исключением центрального потока – он вводится аксиально.



**Рис. 1.** Устройство и конфигурация газовых потоков горелки Фассела (а). 1 – кварцевая трубка горелки, 2 – катушка индуктора, 3 – инжектор (внутренний поток), 4 – патрубок для промежуточного потока, 5 – патрубок для внешнего потока. Расчетная сетка модели горелки (б).

Структурно расчетный модуль модели состоит из двух взаимосвязанных частей – газодинамической, в которой проводится расчет полей скоростей и давления газа, и электромагнитной, в которой происходит учет поступления энергии в плазму от индуктора. Электромагнитная часть менее инерционна, чем газодинамическая, поэтому вычисления ведутся последовательными итерациями: сначала считается шаг по времени в газодинамической части, затем по рассчитанному распределению температур вычисляется распределение проводимости и на его основе рассчитываются электромагнитный нагрев, значение и направление сил. Далее эти величины как исходные данные входят в следующую итерацию расчета газодинамической части и вычислительный цикл продолжается.

В газодинамической части движение вязкого теплопроводящего газа в присутствии силы тяжести описывается системой уравнений Навье–Стокса (1, 2 и 4).

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{u} = S_p, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $\mathbf{u}(x, y, z)$  – векторное поле скоростей газа,  $x, y, z$  – пространственные декартовы координаты,  $S_p$  – величина, характеризующая объемный источник массы,  $S_p \neq 0$  в областях, являющихся источниками массы.

Уравнение переноса импульса

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = \rho \mathbf{g} + \mathbf{S}_f - \nabla p + \operatorname{div} \mathbf{P}_{\text{visc}}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения,  $\mathbf{S}_f$  – объемный источник силы,  $p$  – давление газа, определяемое выражением (5),  $\mathbf{P}_{\text{visc}}$  – тензор напряжений, определяемый выражением

$$\mathbf{P}_{\text{visc}} \equiv \left\{ \tau_{ij} \right\} = \left\{ -\frac{1}{3} \mu e_{kk} \delta_{ij} + \mu e_{ij} \right\}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости,  $e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  – тензор вязких напряжений,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Уравнение теплопроводности

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho I}{\partial t} + \operatorname{div} \rho I \mathbf{u} = \\ = S_I + \operatorname{div} \left( \frac{\lambda}{C_V} \nabla I \right) + (\mathbf{P} \cdot \nabla \mathbf{u}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I = I_{\text{act}} + I_{\text{noact}}$  – внутренняя энергия, состоящая из компонент, связанных с поступательными, вращательными и колебательными степенями свободы соответственно,  $S_I$  – объемный источник тепловой энергии,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\mathbf{P} = -p\{\delta_{ij}\} + \mathbf{P}_{\text{visc}}$  – суммарный тензор напряжений,  $C_V$  – молекулярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Давление газа находится из уравнения состояния

$$p = (\gamma_{\text{act}} - 1)\rho(I - I_{\text{noact}}(I)), \quad (5)$$

где  $\gamma_{\text{act}} = C_{P\text{act}}/C_{V\text{act}}$  – постоянная адиабаты, связанная с “активными” (поступательными и вращательными) степенями свободы частиц газа,  $C_{P\text{act}}$  и  $C_{V\text{act}}$  – теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно.

Для “активных” степеней свободы теплоемкость при постоянном давлении определяется как

$$C_{V\text{act}} = \frac{1}{\gamma_{\text{act}} - 1} \frac{k}{m},$$

а внутренняя энергия как  $I_{\text{act}} = C_{V\text{act}}T$ , где  $T$  – абсолютная температура.

Для “неактивной” (колебательной) компоненты внутренней энергии выполняется следующее соотношение с граничным условием  $I_{\text{noact}}(T = 0) = 0$ :

$$\frac{dI_{\text{noact}}}{dT} = C_{V\text{ noact}}(T).$$

Исходные уравнения системы (1, 2 и 4) дискретизируются и в дальнейшем решаются методом контрольных объемов в программном комплексе FLUENT®. Источниковые члены  $S_p$ ,  $\mathbf{S}_f$  и  $S_I$  в уравнениях (1, 2 и 4) являются связующими переменными между газодинамической и электромагнитной частями модели. На рис. 1б приведена расчетная сетка модели, полностью описывающая геометрию кварцевой горелки.

В электромагнитной части модели принято допущение, что плазма представляет собой обычное проводящее тело, изменяющее свои размер и форму. На основании данных моделирования [9] область выделения тепловой энергии в плазме можно представить в виде частично деформированного тороида, в качестве образующей которого выступает эллипс с полуосами длиной 15 и 4 мм вдоль оси и вдоль радиуса. Удельная мощность внутри тороида квадратично возрастает от нуля на границе до максимального значения на образующей окружности. Интегральная мощность поддерживается постоянной. Проводимость аргоновой плазмы при 10 000 К составляет приблизительно  $1000 \Omega^{-1} m^{-1}$  [10], что значительно (на 3–4 порядка) меньше, чем у металлов, поэтому приближение скин-слоя здесь не работает.

## Экспериментальная установка

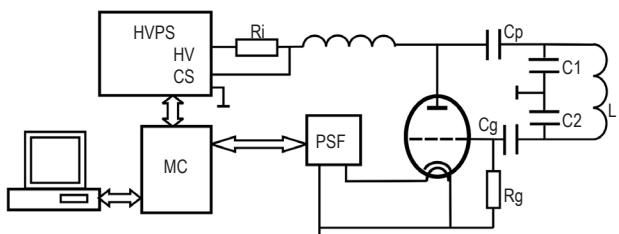
Для практической апробации результатов моделирования горелки для ИСП был разработан экспериментальный комплекс, состоящий из исследовательского генератора ИСП, шлирен-системы для визуализации пространственной структуры газовых потоков в горелке и спектрометра для получения информации о температуре в зоне разряда по интенсивности эмиссионных спектров.

Для возбуждения в горелке разряда ИСП служит исследовательский генератор. Его особенностью является меньшая критичность к параметрам индуктора, что позволяет в достаточно широких пределах менять индуктивность катушки и добротность контура. По этой

же причине практически невозможно использовать генераторы от серийных аналитических спектрометров. Поскольку в генераторе при апробации индукторов различной конфигурации могут возникать существенные перегрузки активного элемента как по току, так и по напряжению, предпочтение отдано ламповому варианту, который значительно устойчивее к перегрузкам подобного рода, чем транзисторные схемы.

На рис. 2 приведена функциональная схема исследовательского генератора. В качестве активного элемента генератора выбран мощный генераторный триод ГУ 5Б (частота генерации до 100 МГц, мощность до 5 кВт, охлаждение принудительное воздушное). Генератор выполнен по схеме емкостной трехточки (схема Колпитца) [11] с двумя комплектами воздушных частотозадающих конденсаторов на 27 и 40 МГц, колебательная мощность регулируется анодным напряжением в пределах от 600 до 2000 Вт.

Исследуемая горелка размещалась в юстировочном устройстве, установленном на верхней крышке корпуса генератора. Положение индуктора зафиксировано относительно генератора, а горелка способна перемещаться по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Ось горелки ориентирована горизонтально и расположена перпендикулярно оптической оси шлирен-системы.



**Рис. 2.** Функциональная схема оригинального радиочастотного генератора для возбуждения индуктивно-связанного разряда. HVPS – высоковольтный блок питания со стабилизацией мощности в нагрузке, PSF – блок питания цепи накала с функцией плавного разогрева, MC – управляющий микроконтроллер, Ri, Rg – измерительное и сеточное сопротивления соответственно, Cp, Cg – анодный и сеточный конденсаторы соответственно, L – катушка индуктора, C1, C2 – частотозадающие конденсаторы, HV – выход высокого напряжения, CS – вход контроля потребляемого тока.

Система подачи газа (аргона) использует двухступенчатую стабилизацию давления и плавную регулировку потоков. Расход аргона составлял 1 л/мин (распылитель), 0,8 л/мин (защитный газ) и 15 л/мин (плазмообразующий). Охлаждение трехвиткового индуктора, выполненного из медной трубы, осуществлялось протекающим внутри нее аргоном. Используемый индуктор полностью совпадает по размерам с оригинальным индуктором для спектрометра *Elan DRC II* (Перкин Элмер, США). Инициирование плазмы проводилось при остановленном потоке распылителя на максимальной мощности генератора (2 кВт) искровым разрядом между внутренним электродом, расположенным внутри патрубка защитного потока газа и подставным заземленным электродом. Процесс инициирования факела обычно проходит через стадию образования шнурового, хаотически колеблющегося в электромагнитном поле разряда. В течение нескольких миллисекунд степень ионизации аргона в трубке возрастает, и разряд принимает каплеобразную форму, типичную для плазменного факела. После выхода на рабочий режим мощность снижается до требуемой величины и выставляется необходимое значение потока распылителя. Представленные в данной работе изображения плазмы регистрировались без распыления анализируемых растворов в плазму.

Для визуализации пространственной структуры газовых потоков существует ряд прямых контактных методик [12, 13], а также большое количество бесконтактных оптических методов, подробно описанных в работе [14]. Среди них шлирен-метод (метод Типлера) [15] является наиболее простым, а соответствующее оборудование недорогим и доступным. Его дополнительным преимуществом является способность визуализировать более слабые оптические неоднородности. Практика показала [16], что именно шлирен-метод целесообразно применять для исследования пульсационных характеристик турбулентных потоков. При практической реализации этого метода предпочтение отдается системам с параллельным ходом лучей через исследуемую область. При визуализации горящей плазмы наиболее серьезной проблемой является ее собственное свечение, которое вносит искажение в регистрируемую картину, а также высокая динамичность протекающих в плазме процессов. В работах [17, 18] приведены примеры применения

метода голограммической интерферометрии для визуализации плазменных потоков в плазмотроне непрерывного действия. Отличительной особенностью подобных экспериментов являются высокая яркость исследуемого объекта, нагрев оптических элементов и недостаточная мощность просвечивающего источника, которые в ряде случаев не позволяют получить достаточно информативные результаты. В рассматриваемом случае в качестве источника просвечивающего излучения используется дуговая ксеноновая лампа типа ДКСШ-250 мощностью 250 Вт, обеспечивающая необходимую для подавления собственного свечения плазмы интенсивность просвечивающего излучения. Оптическая схема установки представлена на рис. 3.

Излучение просвечивающего источника 1 с помощью конденсорной системы 2 фокусируется в плоскости ножей щели 3. Щель располагается в фокальной плоскости объектива осветителя 4 и имеет возможность вращения вокруг оптической оси системы. В качестве объектива использована скорректированная на aberrации линза диаметром 100 мм и фокусным расстоянием 500 мм. Элементы осветителя смонтированы на единой оптической плате. Осветитель формирует параллельный просвечивающий пучок в исследуемой зоне горелки 5. Камерная часть теневого прибора состоит из объектива 6, идентичного 4, и подвижного ножа Фуко 7, расположенного в фокальной плоскости объектива 6. Нож имеет возможность перемещения вдоль фокальной плоскости, а также вращения вокруг главной оптической оси системы. Регистрация теневой картины осуществляется цифровой камерой 8. Система настраивается таким образом, чтобы на фоточувствительной поверхности матрицы изображалось исследуемое сечение 5. Синхронным вращением входной щели и ножа в плоскости, перпендикулярной оптической оси, можно выбирать исследуемое сечение. Применяемая цифровая камера Casio EX-F1 позволяет проводить высокоскоростную видеосъемку в четырех режимах: 30–300 (разрешение 512×384), 300 (разрешение 512×384), 600 (разрешение 432×192) и 1200 (разрешение 336×96) кадров в секунду, обеспечивая максимальное временное разрешение 0,83 мс. Поскольку процессы в разряде ИСП являются быстропротекающими, то в работе использовались скорости видеосъемки 600 и 1200 кадров в секунду. Качество изображения при

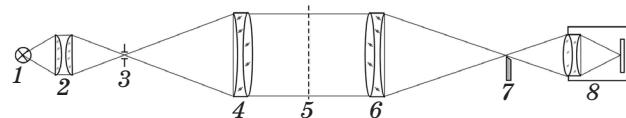


Рис. 3. Оптическая схема шлирен-системы. Пояснения в тексте.

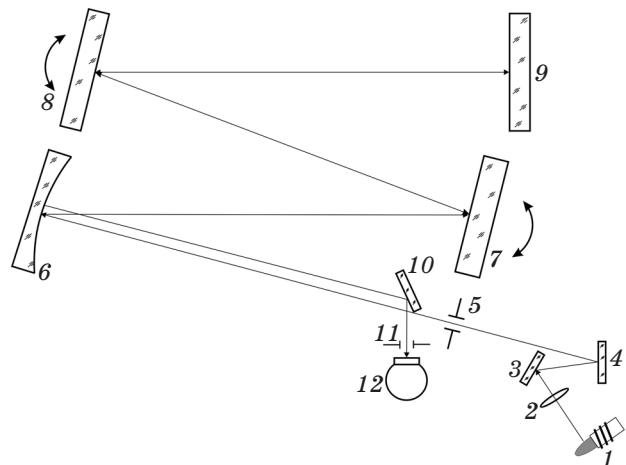


Рис. 4. Оптическая схема двойного монохроматора. Пояснения в тексте.

уменьшении разрешения страдает незначительно, поскольку при этом камера уменьшает регистрируемую область, а не объединяет пиксели.

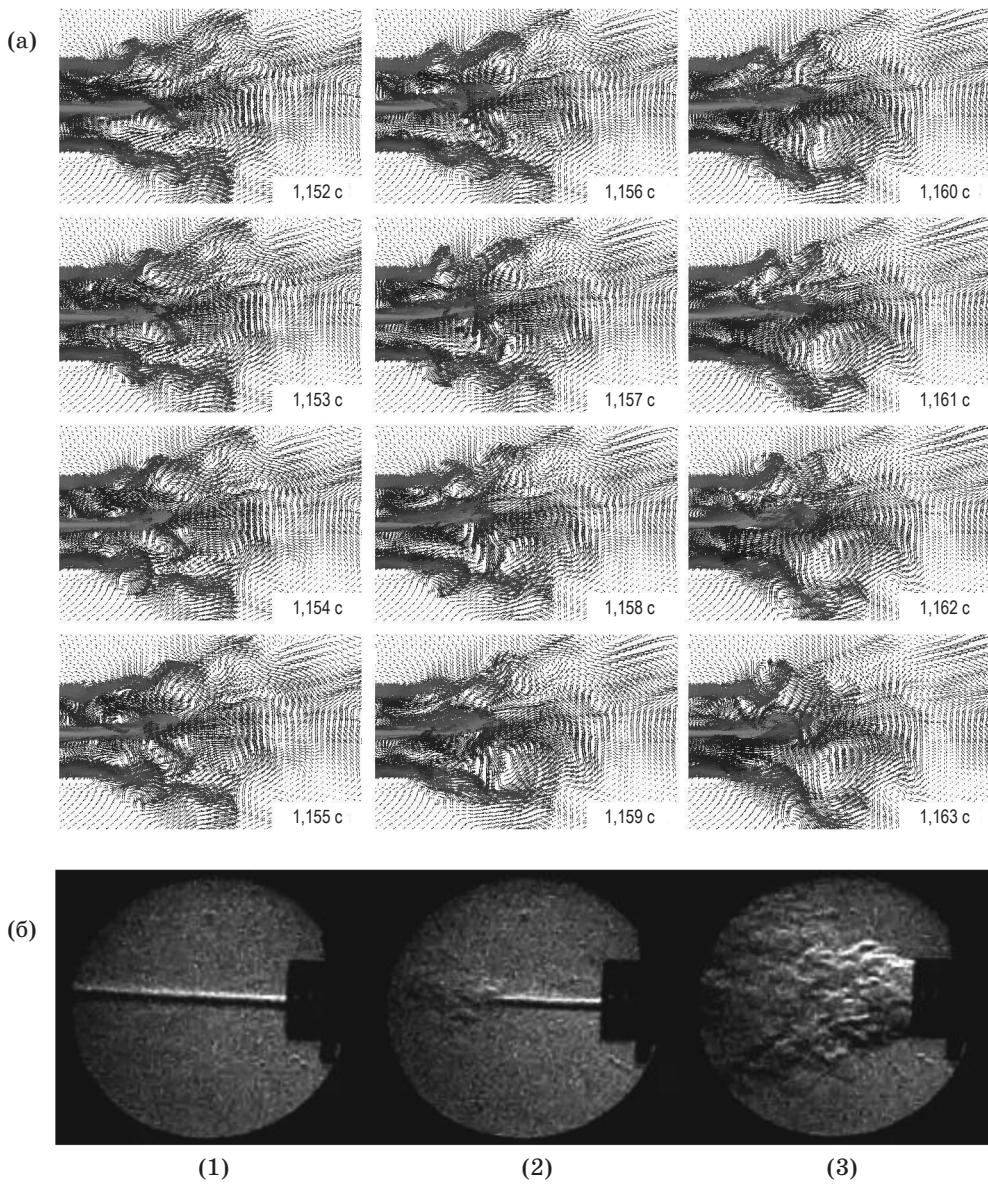
Спектрометр для получения информации о температуре в зоне разряда по интенсивности эмиссионных спектров построен на основе двойного дифракционного монохроматора со спектральной разрешающей способностью не хуже 0,02 нм.

Оптическая схема двойного монохроматора представлена на рис. 4. Изображение источника 1 посредством линзы осветителя 2 и плоских поворотных зеркал 3, 4 создается на входной щели 5. Далее излучение источника падает на внеосевое параболическое зеркало – коллиматор 6, который формирует пучок параллельных лучей, направленных на дифракционную решетку 7, от которой они дифрагируют в направлении решетки 8. Решетка 8 направляет дифрагированные лучи на плоское зеркало 9, от которого они отражаются, и, следя в обратном направлении, формиру-

ют с помощью плоского зеркала 10 на выходной щели 11 изображение входной щели 5. Обе щели расположены в фокальной плоскости параболоида 6. Фотоэлектрическая регистрация осуществляется малогабаритным фотоэлектронным умножителем R3810 (HAMAMATSU, Япония). Полученный электрический сигнал усиливается, оцифровывается 18-битным аналого-цифровым преобразователем и сохраняется в памяти управляющего компьютера. Для защиты от электромагнитных помех со стороны радиочастотного генератора и плазменного факела вся приемно-регистрирующая система тщательно экранирована и гальванически развязана от внешних цепей. Решетки имеют частоту  $1200 \text{ mm}^{-1}$  и расположены так, что углы падения и дифракции одинаковы для обеих решеток, в результате чего их дисперсии складываются. Обе решетки работают как в прямом, так и в обратном ходе луча и в разных порядках, поэтому в направлении выходной щели монохроматора выходит излучение сразу нескольких спектров. Чтобы оставить на выходе излучение только спектра, сформированного лучами, прошедшими всю схему, решетки развернуты таким образом, чтобы вертикальное смещение основного спектра, вызванное разворотом одной решетки, компенсировалось смещением от разворота второй. При этом все остальные спектры оказываются выше или ниже выходной щели. При таком расположении решеток их главные сечения не совпадают с плоскостью монохроматора, содержащей центры щелей и оптических элементов, что снижает уровень рассеянного света, как правило, сконцентрированного вблизи главных сечений. Сканирование спектра осуществляется синхронным поворотом обеих решеток в противоположных направлениях с помощью шагового двигателя через редуктор, обеспечивающий две скорости вращения с ценой деления шага 0,03 нм/шаг и 0,0009 нм/шаг. Таким образом, на аппаратный контур монохроматора с полушириной 0,02 нм приходится 22 шага двигателя привода при сканировании на медленной скорости. Поскольку зависимость выделяемой монохроматором длины волн от угла поворота решеток при их произвольном расположении не может быть получена аналитически, была проведена экспериментальная калибровка системы сканирования по всему спектральному диапазону с последующей аппроксимацией полученных значений.

## Результаты и обсуждение

Рассмотрим первоначально динамику газовых потоков в горелке без поджига разряда ИСП (“холодный” газ). Такой поэтапный подход позволит по отдельности проанализировать ряд интересных явлений, возникающих в факеле ИСП. На рис. 5а представлена рассчитанная динамика во времени газовых потоков в горелке без приложения электромагнитного поля. Видно (рис. 5а), что поток газа из сопла горелки содержит большое количество макроскопических вихрей. В основной массе эти вихри формируются на выходе горелки и могут быть классифицированы по нескольким группам. Первую, самую многочисленную, группу образуют вихри, дислоцирующиеся вблизи стенок горелки. Как видно на рис. 5а, они образуются возле стенок, а затем одновременно начинают смещаться вниз по потоку. Заметим при этом, что вихри зарождаются непрерывно возле противоположных стенок. Вторую группу образуют вихри, находящиеся за выходом горелки вблизи оси. Они движутся в обратном направлении вместе со значительным объемом газа. Причиной возникновения таких вихрей является взаимодействие центральной струи с обратным потоком газа в области, где они сталкиваются. На рис. 5б приведены шлирен-изображения потока холодного аргона, истекающего из сопла горелки. Расходы газа в л/мин на внутреннем, промежуточном и внешнем потоках были для кадра (1) – 1, 0, 0, для (2) – 1, 1, 0 и для (3) – 1, 1, 15 соответственно. В правой части кадров видно изображение горелки и крайнего витка индуктора. Поскольку горелка имеет цилиндрическую форму, и ее стенки действуют подобно линзе, на шлирен-изображении горелка выглядит непрозрачной. На рис. 5б (кадр 1) видно, что за счет высокой скорости истечения аргона при отсутствии других возмущающих факторов внутренний поток сохраняет свою целостность на достаточно большом расстоянии от края горелки – более 3-х ее диаметров. Включение промежуточного продува с расходом 1 л/мин, поступающего тангенциально и распространяющегося через большое поперечное сечение с невысокой скоростью, приводит к частичной дестабилизации внутреннего потока на расстоянии порядка 2-х диаметров трубы горелки. Наличие внешнего потока аргона с расходом 15 л/мин, поступающего в горелку со значительной тангенциальной составляющей скорости, приво-

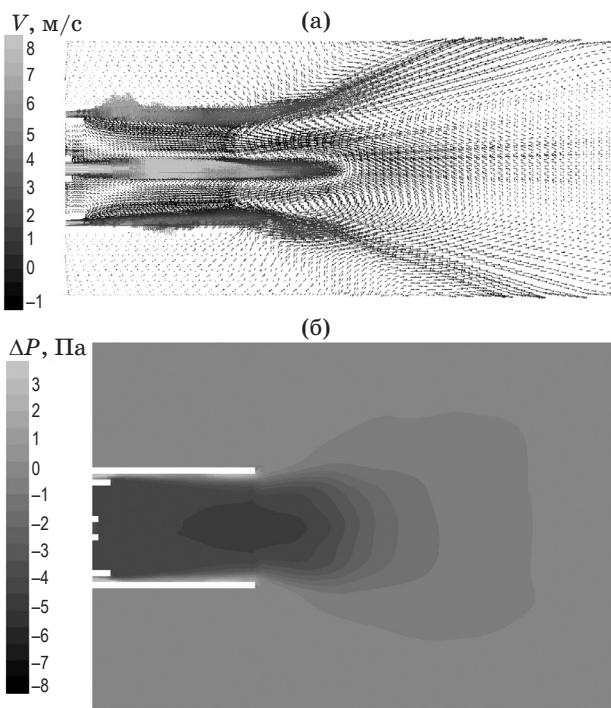


**Рис. 5.** Поля скоростей в продольном сечении горелки в различные моменты времени, рассчитанные (а) и экспериментально визуализированные методом шлирена (б). Кадры на рис. 5б (1) – включен только центральный поток, (2) – центральный и промежуточный потоки, (3) – центральный, промежуточный и внешний потоки.

дит к выражено турбулентному характеру истечения газа из сопла горелки с расположением зоны отрыва вихрей практически сразу за краем трубки горелки.

Одним из оригинальных результатов, полученных с применением разработанной модели, является наличие обратного потока газа в горелке. В работе [12] в плазменной горелке с внутренним диаметром 4 см и с осевой ламинарной подачей газа путем прямых анемометрических измерений с помощью охлаждаемых водой трубок Пито была обнаружена рецирку-

ляционная зона в области разряда. Было показано, что при малых расходах Ar (0,14 г/с) возникает подсос окружающего воздуха на краю трубки горелки. При увеличении расхода Ar до 1,15 г/с подсос воздуха прекращается, хотя рециркуляционная зона сохраняется. Причину возникновения обратного потока газа авторы этой работы связывают с градиентами статического давления Ar, образующимися в результате горения разряда. В рассматриваемом в данной статье случае формирование обратного потока не является очевидным, по-



**Рис. 6.** Усредненная картина в продольном сечении горелки полей скоростей потоков (а) и давления (б) газа. Относительные величины давлений приведены в паскалях. В качестве точки 0 выбрано давление 101325 Па.

Моделирование полей давления газа в продольном сечении горелки ясно показывает дислокацию областей пониженного давления (рис. 6б). Поскольку давление газа за пределами горелки оказывается выше, чем в приосевых областях внутри, окружающий газ устремляется внутрь горелки. На своем пути назад обратный поток сталкивается с промежуточным и центральным потоками, образуя зоны нестабильности, в которых происходит интенсивное вихреобразование. Его взаимодействие с промежуточным потоком не столь интенсивно, как с центральным, ввиду неодинаковых скоростей (менее 1 м/с у промежуточного против 8–10 м/с у центрального). Образующиеся возле оси у входа вихри сносятся обратным течением внутрь горелки, дополнительноdestabiliziruy центральную струю. Как результат, несмотря на то, что согласно усредненной картине скоростей центральная струя простирается как минимум на один диаметр за краем горелки, достаточно продолжительно она существует лишь до края, что хорошо согласуется с результатами шлирен-диагностики (рис. 5б, кадр 3).

## Заключение

Разработана не имеющая аналогов четырехмерная компьютерная модель спектрохимической индуктивно-связанной плазмы. Путем моделирования динамики газовых потоков в горелке без поджига разряда установлено наличие обратного потока газа в краевой зоне факела, а также положение областей вихреобразования. Результаты моделирования экспериментально апробированы с помощью диагностического комплекса на основе исследовательского плазменного генератора и шлирен-системы для визуализации пространственной структуры газовых потоков в горелке.

Выявленный в ходе моделирования газодинамики горелки ИСП обратный поток газа и возникающий вследствие этого подсос окружающего воздуха могут оказать влияние на чувствительность анализа и воспроизводимость получаемых результатов. Загрязнение “чистой” аналитической зоны плазмы атмосферным воздухом может вызвать появление грубых погрешностей измерения концентрации определяемого элемента, особенно при работе вблизи предела обнаружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 09-03-01002-а.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Boulos M.I.* The inductively coupled radio frequency plasma // Pure & Appl. Chem. 1985. V. 57. № 9. P. 1321–1352.
2. *Yang P., Barnes R.M.* Plasma modeling and computer simulation of spectrochemical ICP discharges // Spectrochimica Acta Reviews. 1990. V. 13. № 4. P. 275–309.
3. *Mostaghimi J., Boulos M.I.* Mathematical modeling of the ICPs // In Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry / 2nd ed. 1998. P. 949–983.
4. *McKelliget J. W., El-Kaddah N.* The effect of coil design on materials synthesis in an inductively coupled torch // J. Appl. Phys. 1998. V. 64. № 6. P. 2948–2954.
5. *Schram D.C., Van der Mullen J.A., de Regt J.M., Benoy D.A.* Fundamental description of spectrochemical ICP discharges // J. Anal. Atom. Spectrom. 1996. V. 11. № 9. P. 623–632.
6. *Winge R.K., Eckels D.E., DeKalb E.L., Fassel V.A.* Spatiotemporal characteristics of the inductively coupled plasma // J. Anal. At. Spectrom. 1988. V. 3. P. 849–855.
7. *Winge R.K., Crain J.S., Houk R.S.* High speed photographic study of plasma fluctuations and intact aerosol particles in inductively coupled plasma mass spectrometry // J. Anal. At. Spectrom. 1991. V. 6. P. 601–604.
8. *Iacone L.A., Masamba W.R.L., Nam S.H., Zhang H., Minnich M.G., Okino A., Montaser A.* Formation and fundamental characteristics of novel free-running helium inductively coupled plasmas // J. Anal. At. Spectrom. 2000. V. 15. P. 491–498.
9. *Bernardi D., Colombo V., Coppa G.G.M., D'Angola A.* Simulation of the ignition transient in RF inductively-coupled plasma torches // Eur. Phys. J. 2001. V. D14. P. 337–348.
10. *Dunn G., Eagar T.W.* Metal vapors in gas tungsten arcs: Part II. Theoretical calculations of transport properties // Metallurgical Transactions A. 1986. V. 17A. № 10. P. 1865–1871.
11. *Montaser A., Golightly D.W.* Inductively coupled plasmas in analytical atomic spectrometry / Ed. by Montaser A., Golightly D.W. UK: VCH Publishers, 1992. P. 195.
12. Клубников В.С. Тепловые и газодинамические характеристики индукционного разряда в потоке аргона // Теплофизика высоких температур. 1975. Т. 13. № 3. 473–482.
13. Дундр И., Кучера Я. Гидродинамическая структура турбулентной струи плазмы // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / Под ред. чл.-корр. АН СССР М. Ф. Жукова. Новосибирск: СО Нauка, 1977. С. 244–257.
14. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. 418 с.
15. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
16. Мишин Г.И. Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте. Л.: Наука, 1979. С. 11.
17. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. С. 615.
18. Бурмаков А.П., Шашков А.Г. Интерференционно-голографическое исследование нестационарности и турбулентности плазменной струи // В кн. Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / Под ред. чл.-корр. АН СССР М.Ф. Жукова. Новосибирск: СО Нauка, 1977. С. 216–229.