

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ  
НЕОДНОРОДНОМ ЭНЕРГОВКЛАДЕ

Фирсов А.А. к.ф.-м.н., Леонов С.Б. д.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*alexander.a.firsov@gmail.com*

Экспериментальные исследования электрического пробоя в воздухе в виде длинного ( $D \gg L$  длина много больше диаметра) разрядного канала показали, что пробой происходит не по прямой линии, а по сложной траектории, содержащей множество изломов [1, 2]. Типичный трехмерный вид разрядного канала при расстоянии между электродами 50 мм, восстановленный по взаимно перпендикулярным изображениям, показан на рис.1. Подробная методика восстановления изложена в работах [1, 2].

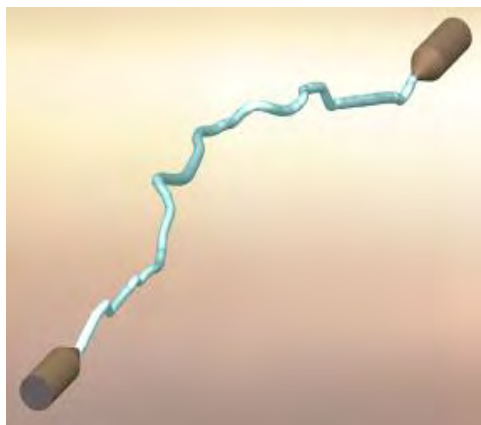


Рис.1. Результат реконструкции разрядного канала [2]

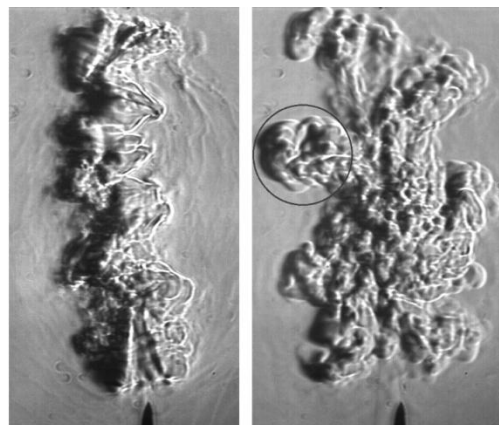


Рис.2. Визуализация образования струй, 250 мкс и 2 мс соответственно [7]

Дальнейшие эксперименты показали, что с помощью введения в межэлектродное пространство дополнительных электродов с целью изменения распределения электрического поля [3, 4] или при использовании фемтосекундного лазера для предварительной ионизации выделенного направления [5] разрядный канал может существенно отклоняться от линии, соединяющей электроды, и иметь изгибы с радиусом существенно меньшим межэлектродного расстояния. Канал низкой плотности, образованный пробоем, распадается крайне нестабильно (неустойчиво, в газодинамическом смысле), с образованием струйных течений и вихревых структур. В частности, изгибы разрядного канала, как естественные, так и вызванные искусственным путем, формируют скоростные струйные течения в направлениях, противоположных изгибам [2-4, 7]. Типичные изображения распадающегося канала, полученные методом Теплера, представлены на рис.2 для случая естественных струй [7] и на рис.14 для случая изгиба, вызванного дополнительным электродом. Следует отметить, что при распаде разрядного канала выполняется условие  $\nabla \rho \nabla P < 0$  на возникновение неустойчивости Релея-Тейлора [6]. Однако получить все интересные данные в эксперименте достаточно сложно, в связи с чем целью настоящей работы являлось численное исследование распадающегося разрядного канала и получение дополнительной информации о протекающих процессах, которые затруднительно получить экспериментально. Моделирование производилось в программном комплексе FlowVision 3.08.

Радиальное распределение параметров для случая осесимметричного разряда было исследовано в одномерной постановке. Численное моделирование процесса, близкого к описанному в [6], было выполнено для типичного энерговклада  $E=300$  мДж на 10 мм длины [2]. Пиковая плотность мощности составила  $5,5 \times 10^{15}$  Вт/м<sup>3</sup>, а длительность

энерговклада составила 70 нс. Тонкий сектор  $0,57^\circ$  ( $100 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$ ) с толщиной 0.01 мм был использован в качестве расчетной области. Давление 1 Атм и температура 283 К были зафиксированы на наименьшей границе. Условия симметрии были использованы на всех остальных границах. Расчетная сетка представляла собой набор из 10000 ячеек со сгущением вдоль радиуса к оси. Таким образом, пространственное разрешение около оси составило 5 ячеек на 0,01 мм. Модель турбулентности не применялась из-за использования высокого пространственного разрешения. Радиус объемного источника тепла был 0,255 мм.

Два интересных факта были обнаружены в одномерном моделировании. Первый состоит в том, что максимальная температура достигается не во время работы источника тепла, а некоторое время спустя из-за быстрого обратного движения газа к оси и роста давления на оси. Временные зависимости максимальной и осевой температуры представлены на рис.3. Второй факт заключается в том, что внутренняя волна давления движется от оси к ударной волне, догоняет и на короткое время ускоряет её в момент времени 1 мкс. Зависимость от времени скорости ударной волны показана на рис.4.

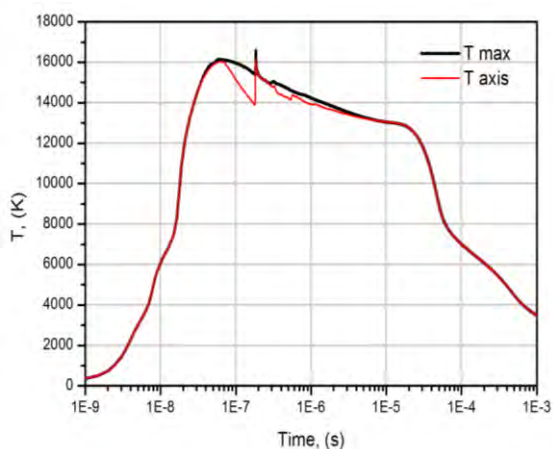


Рис.3. Зависимость температуры от времени

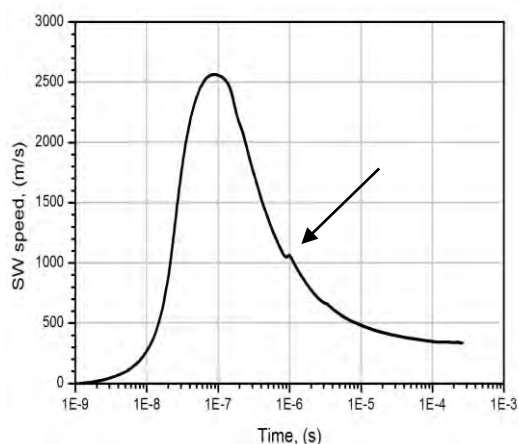


Рис.4. Скорость ударной волны

Поток газа следует за ударной волной в радиальном направлении и данный процесс сопровождается снижением давления на оси разрядного канала. Это приводит к обратному движению некоторой части газа внутри и вокруг разрядного канала, начиная с 20 мкс. Движение газа к оси канала вызывает повышение давления в центральной области канала, в результате чего отрицательный градиент давления пересекает положительный градиент плотности начиная с 40 мкс. Процесс выравнивания давления приводит к возникновению двух точек поворота вектора скорости, которые возникают около границы канала к моменту времени 90 мкс: 1я точка находится внутри и вторая – снаружи нагретой области. Таким образом, в интервале времени [40-90] мкс выполняется условие на развитие неустойчивости Релея-Тейлора:  $\nabla \rho \nabla P < 0$ . Данный процесс приводит к развитию имеющихся начальных возмущений. Поэтому начальные возмущения крайне важны для возникновения и развития неустойчивости.

Разряд с прямой осью и искривленной границей был рассмотрен в двумерной постановке в двух вариантах: сечение, перпендикулярное оси разряда и сечение вдоль оси. В указанных проектах была использована двумерная расчетная сетка с двумерной локальной адаптацией. Подробная методика создания двумерной адаптации изложена в работе [8]. В первом проекте разрядный канал был промоделирован с помощью объемного источника тепла, максимальный радиус которого был 0,4 мм, а минимальный - 0.365 мм (см. рис.5). Радиальный профиль энерговклада представлен на рис.6, зависимость объемной плотности мощности от времени была использована такая же, как в предыдущем моделировании.

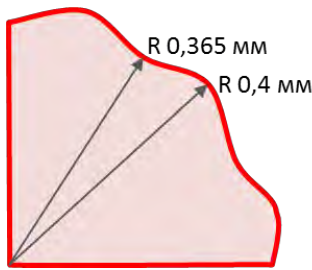


Рис.5. Геометрия источника тепла

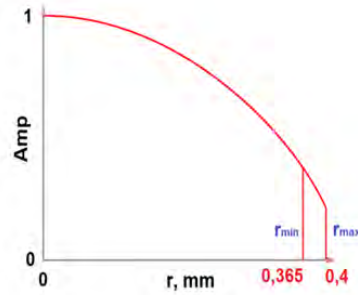
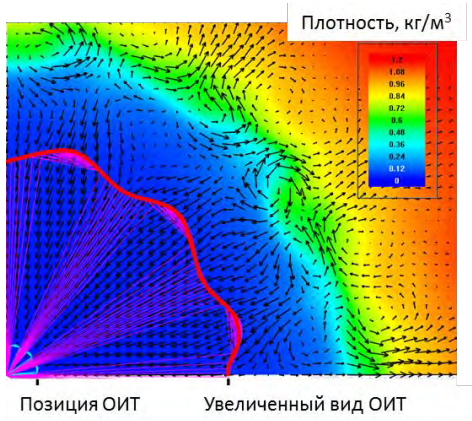
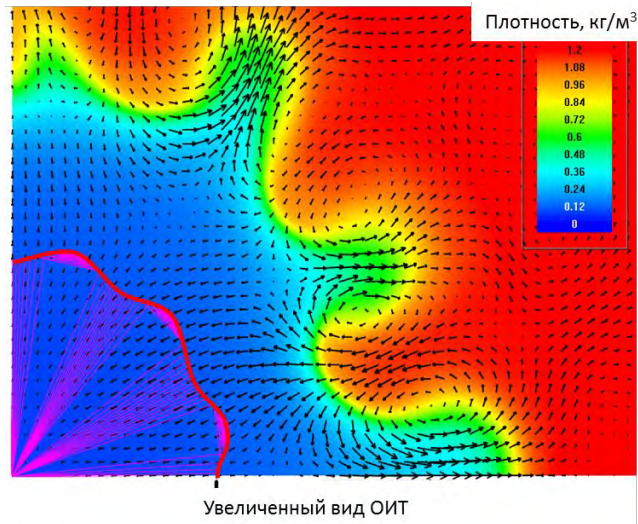


Рис.6. Радиальный профиль энерговклада



(а) 90 мкс



(б) 1 мс

Рис.7. Распределение плотности ( $\text{кг/м}^3$ ) и векторы скорости

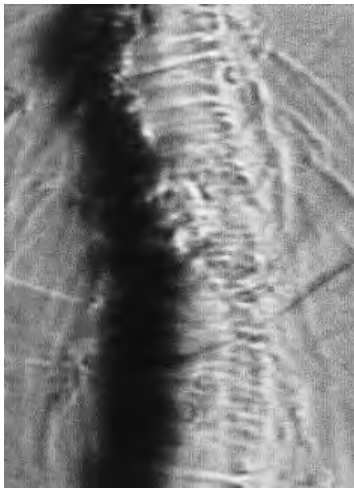


Рис.8. Теневая картина высокого разрешения (момент времени 40 мкс) [7]

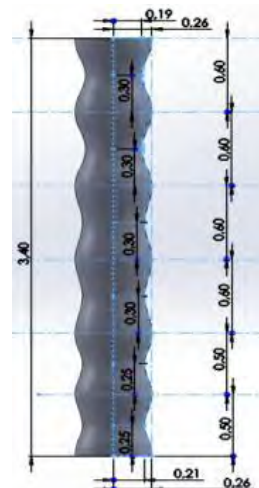


Рис.9. Геометрия источника тепла

Как показано на рис.7(а), вихреобразное движение газа формируется к моменту времени 90 мкс, и это соответствует газодинамическому процессу развития неустойчивости Релея-Тейлора, исследованной с помощью одномерного моделирования. Можно сделать вывод, что начальная завихренность, возникшая благодаря неустойчивости Релея-Тейлора, затем развивается в значительные возмущения границы раздела (рис.7(б)), а эволюция зависит от искажения начальной геометрии и энерговклада. Основная проблема заключается в том, что мы можем только предполагать форму начальной геометрии поперечного сечения и пространственное распределение энерговклада, т.к. экспериментальные данные об этих параметрах отсутствуют.

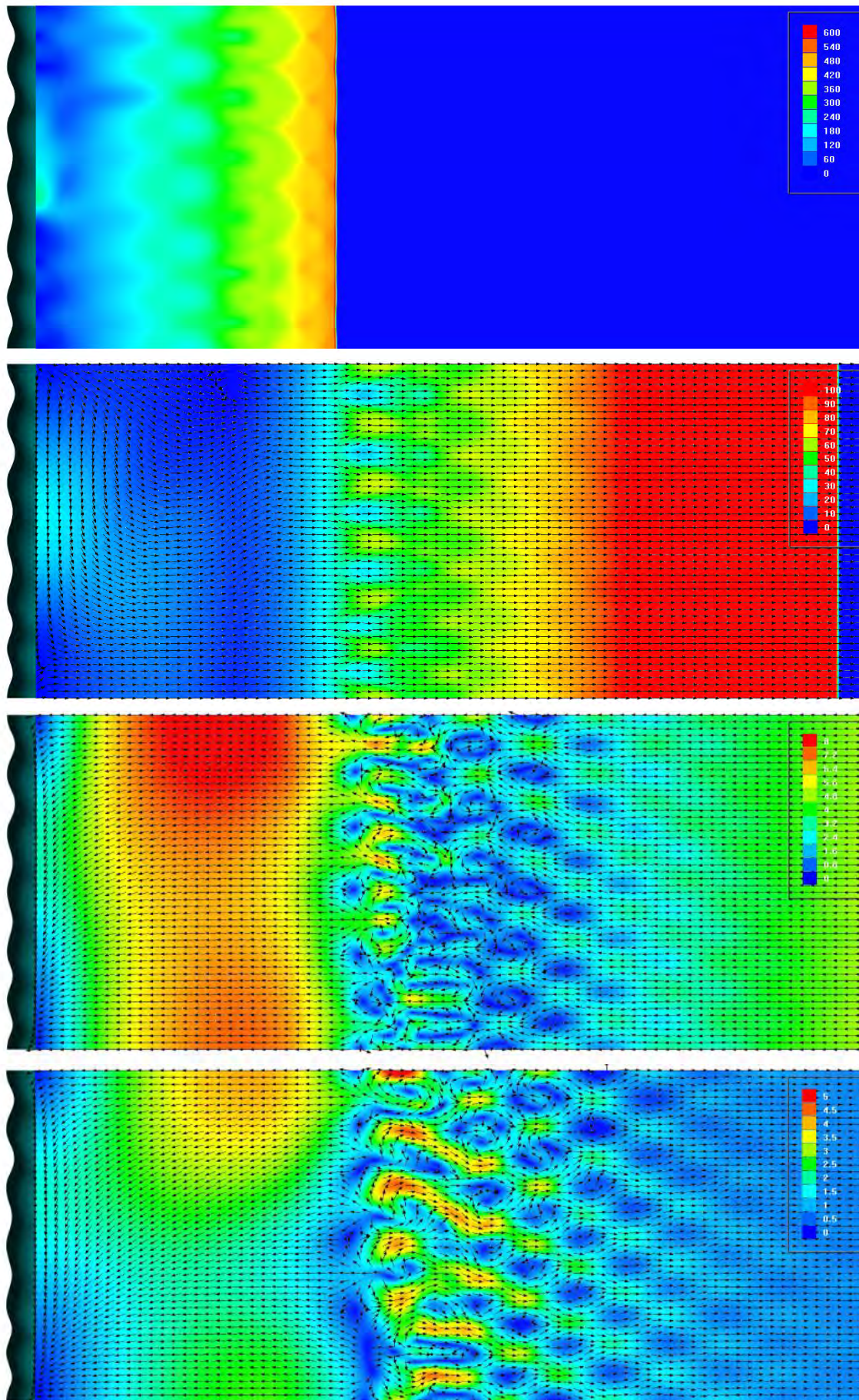


Рис.10. Поле скоростей (м/с): 2, 10, 50 и 100 мкс

Доступен для анализа достаточный объем экспериментальной информации о продольных искривлениях разряда. Флуктуации диаметра канала – один из важных типов продольных искривлений искрового разряда. Предположительно именно влияние этого эффекта запечатлено на снимке, полученном методом Теплера с повышенным пространственным разрешением (см.рис.8). Возможно это основной вид начальных флуктуаций плотности для эволюции неустойчивости Рэля-Тейлора. Двухмерное численное моделирование для этого случая было выполнено для уточнения сделанного предположения. Геометрия расчетной области представляла собой сектор цилиндра с углом  $1^\circ$  и высотой  $h=3,4$  мм (ось цилиндра вдоль  $z$ ). Геометрия осесимметричного источника тепла представлена на рис.9. Значение удельной мощности  $P(z)$  удовлетворяет условию:  $P(z)S(z)\Delta z = \text{Const}$ , где  $S(z)$  является площадью поперечного сечения геометрии источника тепла. Модель турбулентности не использовалась из-за высокого пространственного и временного разрешения. Как показано на рис.10, вихревая структура формируется во время выполнения условия на развитие неустойчивости Рэля-Тейлора: в интервале времени 50-100 мкс. Представленные на рис.10 вихри хорошо разрешены расчетной сеткой. Результаты очень близки к рассматриваемой схеме формирования возмущений на границе распадающегося послеразрядного канала. Полученное распределение плотности позволяет сделать вывод об увеличении границы раздела между основным малоплотным ядром и плотной средой.

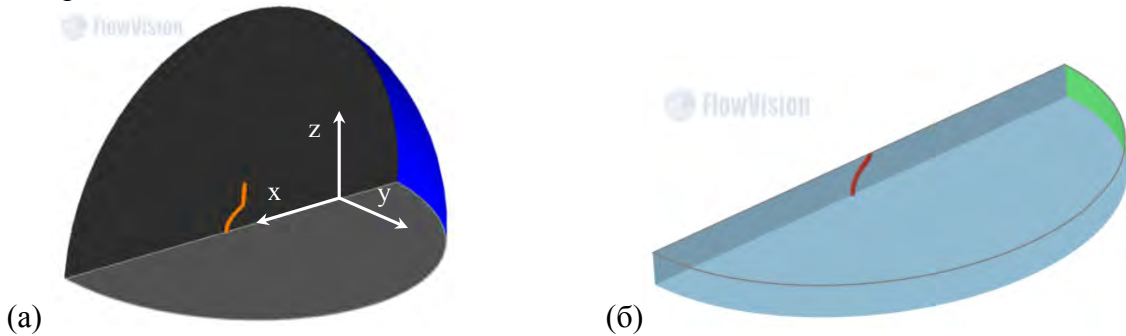


Рис.11 Геометрия расчетной области при трехмерном моделировании

Разряды конечной и бесконечной длины с искривленной осью были промоделированы в трехмерной постановке с целью исследования механизма формирования быстрых газовых струй, вызванных искривлениями разрядного канала. Расчет производился с использованием широко распространенной  $k-\epsilon$  модели турбулентности. Расчетный домен для конечного искрового канала представлял собой четверть эллипса, размеры которого  $R_x=R_y=32$  мм и  $R_z=36$  мм (рис.11(а)). В случае искры бесконечной длины рассматривался фрагмент разрядного канала, заключенный между двумя плоскостями симметрии, а в качестве расчетного домена была использована половина цилиндра с размерами  $R32 \times 4$  мм (рис.11(б)). Начальные условия в расчетной области: давление  $P = 101325$  Па, температура  $T = 273$  К и скорость  $V=0$  м/с. Условие симметрии (гладкая стенка без прилипания) было использовано на плоских гранях для уменьшения количества ячеек расчетной сетки. На остальных поверхностях параметры воздуха были приняты равным начальным значениям.

Пробой разряда моделируется с помощью объемного источника тепла (ОИТ), в качестве которого используется половина искривленного цилиндра, схема которого представлена на рис.12. Итоговый объем всех ячеек, на которые воздействовал ОИТ, составил  $9.67E-10$  м<sup>3</sup>. Таким образом, максимальная мощность ОИТ (при пересчете на полный объем, включая области, отсеченные плоскостями симметрии) составила  $\sim 20$  МВт для 17 мм длины. Начальный шаг по времени составил 1 нс и затем увеличивался. Расчет проводился до временной отметки 2 мс.

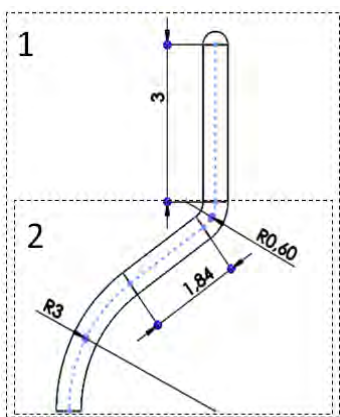


Рис.12. Геометрия источника тепла

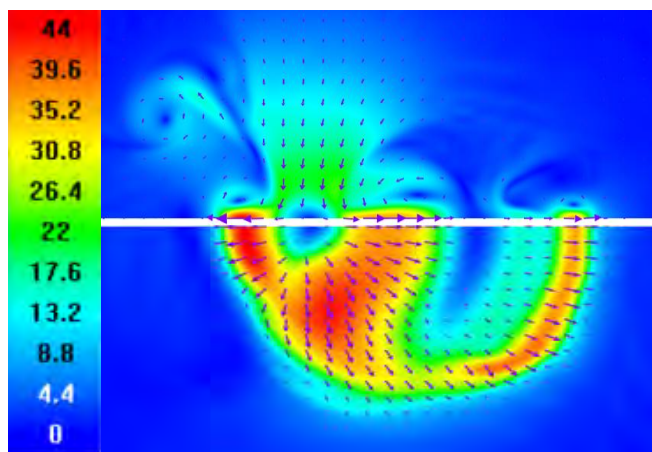


Рис.13. Поле скоростей (м/с).

В плоскости xz – сверху, в плоскость xy – снизу.

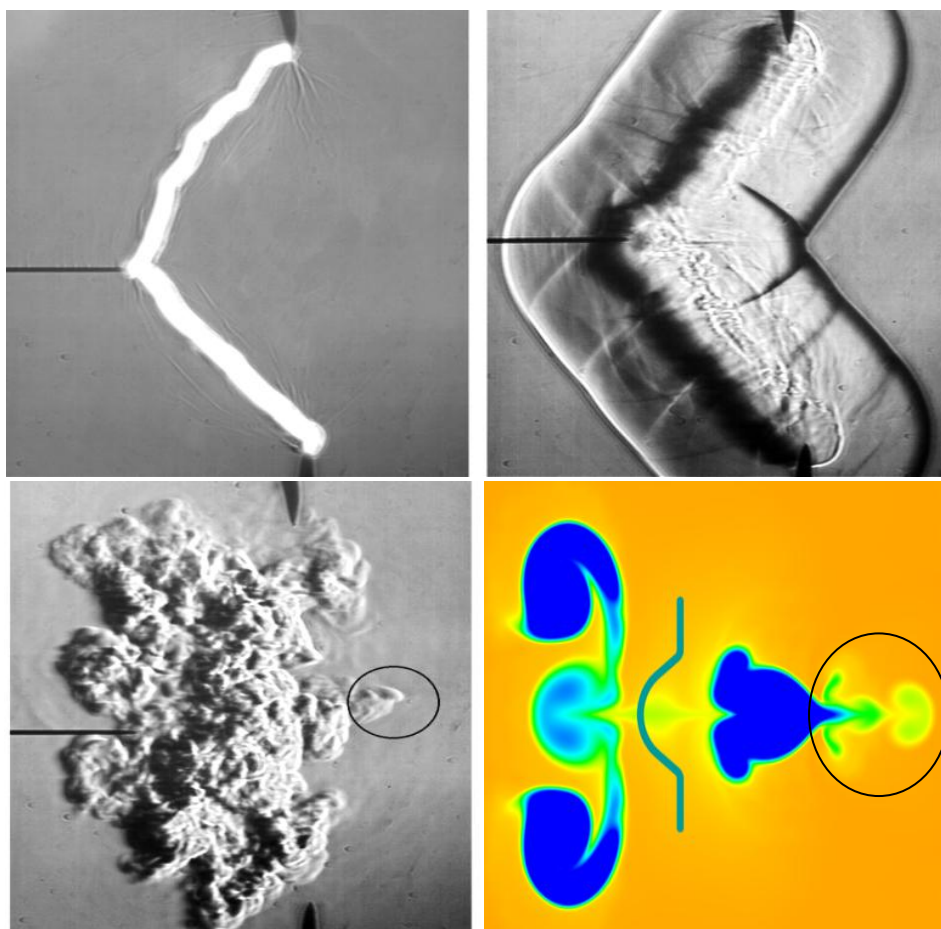


Рис.14. Сравнение моделирования с результатами эксперимента.

Теневые изображения с задержкой 0 мкс, 40 мкс и 2 мс соответственно [7].

Распределение плотности (CFD) – момент времени 1 мс.

Расчет был выполнен на реконфигурируемой гексагональной прямоугольной сетке, основой для которой служила опорная сетка  $32 \times 16 \times 18$  ячеек с 2 мм кубической ячейкой. Ячейки размером 31,25 мкм (6й уровень адаптации) были использованы в небольшом объеме вокруг и внутри искривленного цилиндра в начале расчета. Во время расчета максимальный уровень адаптации постепенно понижался, при этом разные уровни адаптации, выбранные исходя из характерных особенностей газодинамических возмущений, были использованы для разных зон расчетной области. Количество ячеек расчетной сетки менялось в диапазоне от  $0.45 \times 10^6$  до  $2.27 \times 10^6$  ячеек.

Как показано на рис.13, оба закругления разрядного канала вызывают струйные течения, и граница каждого возмущения убегает от места пробоя. Хорошо видно, что возмущение распространялось в широком секторе  $\sim 80^\circ$ . Представленные на рис.14 данные позволяют сделать вывод, что возмущения представляют собой спиральные вихреобразные структуры, которые двигаются и расширяются в направлениях, определенных искривлениями разрядного канала. Вид изоповерхности плотности для значения  $1,25 \text{ кг/м}^3$  в момент времени 2 мс представлен на рис.15. Серый цвет на этой иллюстрации – объем, охваченный послеразрядными вихрями и возмущениями, а фиолетовый цвет – первоначальный разрядный канал.

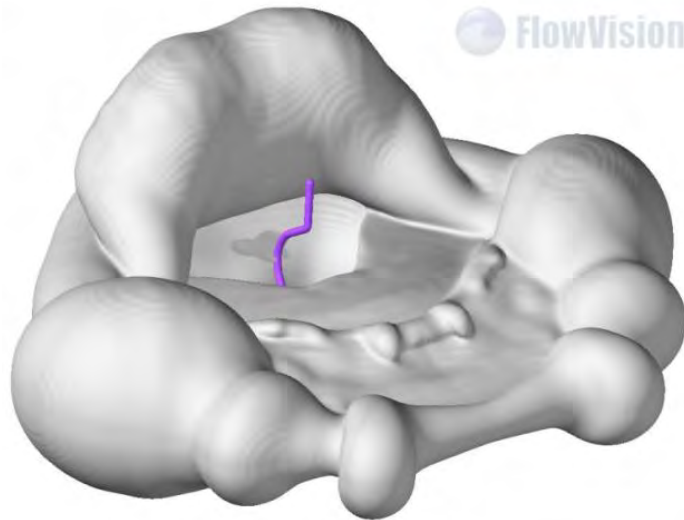


Рис.15. Область, охваченная возмущениями: изоповерхность плотности  $1,25 \text{ кг/м}^3$  в момент времени 2 мс

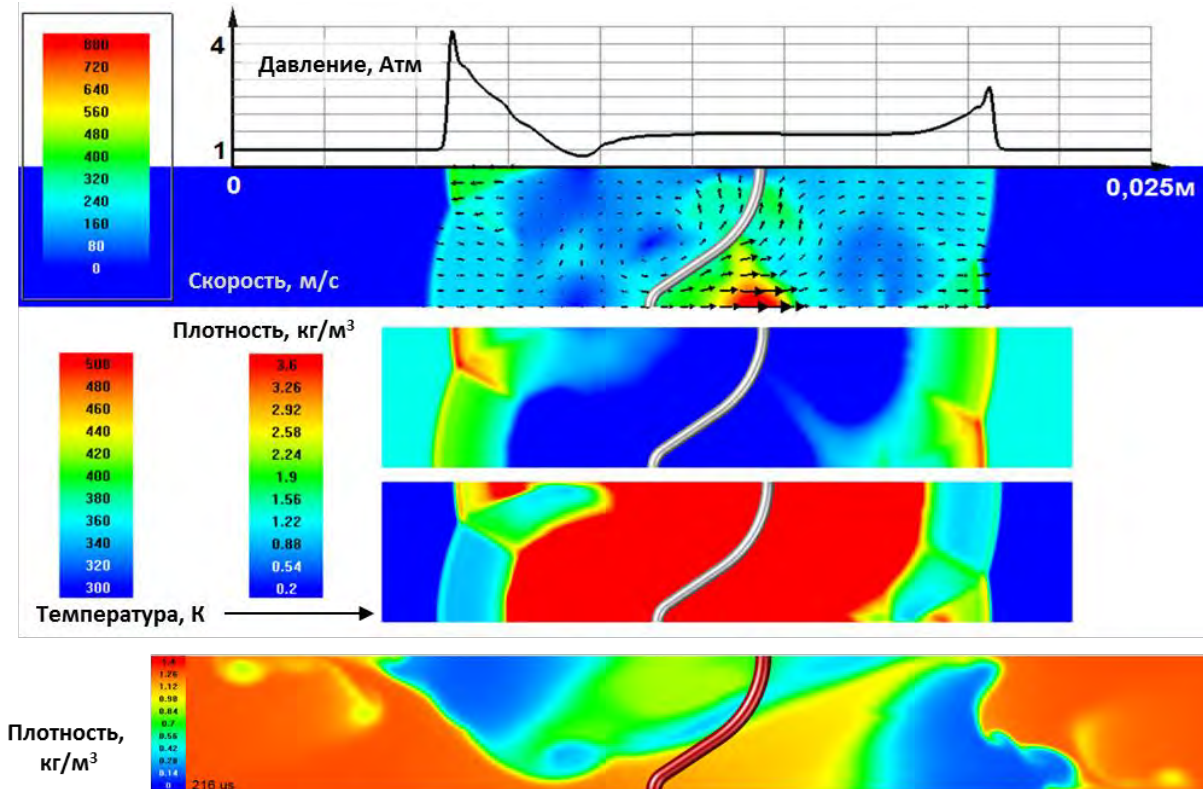


Рис.16. Механизм формирования струй (на примере второго трехмерного моделирования). Верхние изображения – момент времени 7,7 мкс; нижнее – 216 мкс.

В ходе моделирования было обнаружено, что взаимодействие ударных волн не только определяет развитие и направление развития неустойчивостей. В ряде случаев следом за ударной волной распространяется слабое, но быстрое вихревое образование, являющееся предвестником основного возмущения. Данная структура начинает формироваться на стадии нерегулярного отражения ударных волн. Как показано на рис.16, прямой скачок увлекает за собой порцию горячего газа низкой плотности, которая затем отрывается от основной послеразрядной области, а между ними возникает зона пониженного давления. На рис. 16 представлено распределение плотности в послеразрядном канале для различных моментов времени. Видно, что струя, образованная изгибами, разбивается на две части: основную и часть с более высокой радиальной скоростью, следующую перед основной струей. Однако, как показано на рис.14, при моделировании распада конечного канала отрывается от основной зоны только структура, обусловленная центральным изгибом, а формирование, вызванное изгибом меньшего радиуса, движется как единая струя. Подтверждение эффекта разделения струи, полученного в представленных расчетах, было найдено в эксперименте [7]. Наиболее явно эта структура видна в опытах с дополнительными электродами – быстрое вихревое формирование выделено на рис.14.

Таким образом, в представленной работе анализируется механизм развития газодинамических возмущений в воздухе, вызванных пространственно неоднородным энерговыделением высокой мощности. Численное моделирование позволило получить детальную информацию о параметрах потока при взаимодействии разряда с газовой средой. Формирование быстрых струй, первоначально наблюдаемых экспериментально, подтверждено с помощью численного моделирования. Получена информация о трехмерной структуре струи. Обнаружено, что в некоторых случаях струя разделяется на две части: основную и быструю, формирующую газодинамический «предвестник». Численно исследованы условия возникновения неустойчивости Релея-Тейлора и её влияние на первоначально искаженную форму разрядного канала. Обнаружено, что температура газа в разрядном канале достигает максимального значения через некоторое время после выключения источника тепла. Этот эффект вызван возвратно-поступательными движениями газа в разрядном канале, которые затем ускоряют ударную волну, а также создают условия для развития неустойчивости Релея-Тейлора.

### Литература:

1. S.B. Leonov, A.A. Firsov, Yu.I. Isaenkov, D.A. Yarantsev, M.N. Shneider - High-Power Filamentary Pulse Discharge in Supersonic Flow // AIAA 2010-259
2. S.B. Leonov, Y.I. Isaenkov, A.A. Firsov, S.L. Nothnagel, S.F. Gimelshein, M.N. Shneider - Jet regime of the afterspark channel decay // Phys. Plasmas 17, 053505, 2010
3. S.B. Leonov, A.A. Firsov, Yu.I. Isaenkov, D.A. Yarantsev, M.A. Shurupov, M.N. Shneider - Plasma-Based Fast Mixing and Ignition in Supersonic Flow // AIAA 2011-2327
4. A.A. Firsov, M.A. Shurupov, D.A. Yarantsev, S.B. Leonov - Mixing Actuation by Unstable Filamentary Discharge // AIAA 2013-1188
5. S.B. Leonov, A.A. Firsov, M.A. Shurupov, J.B. Michael, M.N. Shneider et al. - Femtosecond laser guiding of a high-voltage discharge and the restoration of dielectric strength in air and nitrogen // Phys. Plasmas 19, 123502, 2012
6. M.N. Shneider - Turbulent decay of after-spark channels // Phys. Plasmas 13, 073501, 2006.
7. M.A. Shurupov, A.A. Firsov, S.B. Leonov, K.V. Savelkin, D.A. Yarantsev - Development of gas-dynamic disturbances after pulse electrical discharge // 12<sup>th</sup> International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, ИИТ RAS, Moscow, 26-28 March 2013.
8. А.А. Фирсов, И.В. Москалев - Создание двухмерной расчетной сетки в программном комплексе FlowVision с использованием адаптации // Международный форум «Инженерные системы-2013», Москва, 15-16 апреля 2013