

04;12

Взрывной плазменно-вихревой источник оптического излучения

© С.С. Буланов, Р.У. Есиев, М.Н. Жарников, А.С. Камруков,
И.В. Кожевников, Н.П. Козлов, М.И. Морозов, И.А. Росляков,
Ю.А. Степанов

НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
E-mail: kamrakov@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2007 г.

Представлены результаты экспериментального исследования динамики и излучения крупномасштабных вихревых структур, формируемых в атмосферном воздухе с помощью взрывных генераторов импульсных плазменных потоков. Показана возможность получения долгоживущих плазменных образований с большой излучающей поверхностью и полным выходом оптического излучения на уровне нескольких процентов от запасаемой химической энергии ВВ. Генерируемый импульс излучения включает компоненты микро- и миллисекундных диапазонов длительностей.

PACS: 52.35.We, 52.50.Lp

Коэффициент полезного действия современных взрывных источников излучения, как правило, заметно меньше 1% от химической энергии ВВ [1]. Исследование возможностей значительного (в несколько раз и более) повышения относительного выхода излучения таких источников является актуальной для ряда практических приложений задачей, решение которой может быть связано как с оптимизацией процессов ударно-волновой конверсии кинетической энергии плазменных потоков в излучение, так и с привлечением новых физических и радиационно-газодинамических эффектов и явлений. В этом аспекте значительный интерес представляют вихревые течения излучающего газа, сопровождающиеся при определенных условиях формированием долгоживущих когерентных структур, в частности крупномасштабных тороидальных вихрей. Такие плазменные образования могут явиться источником достаточно интенсивного электромагнитного излучения оптического (видимого и инфракрасного) диапазона спектра. В настоящее время

высокотемпературные плазменные тороидальные вихри получают с помощью импульсных электроразрядных плазмотронов при организации осесимметричной инжекции плотной плазмы в атмосферный воздух [2,3].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований динамики и излучения крупномасштабных вихревых структур в атмосферном воздухе, формируемых с помощью взрывных генераторов плазмы.

Для получения высокоэнтальпийных импульсных плазменных потоков использовались малогабаритные генераторы с цилиндрическим зарядом конденсированного ВВ $\varnothing \times l = 23 \times 42 \text{ mm}^2$ (\varnothing — наружный диаметр, l — длина заряда ВВ) на основе октогена. Масса заряда ВВ — 25 g. Заряд имел коническую выемку с выходным диаметром 10 mm, длиной 23 mm и углом раствора $2\alpha \approx 17^\circ$. Эксперименты выполнены с зарядами трех модификаций: „А“ — заряд без облицовки и заполнения кумулятивной выемки; „В“ — заряд с облицовкой алюминиевой фольгой толщиной 0.3 mm, масса облицовки 0.5 g; „С“ — заряд с заполнением кумулятивной выемки Al-пудрой или коническим вкладышем из пористого алюминия; средняя плотность заполнения в том или в другом варианте 0.9 g/cm^3 , масса — 1.5 g. Генерируемая во взрывном кумулятивном процессе плазменная струя истекала сначала в заполненную атмосферным воздухом камеру предварительного расширения (объем $\sim 10 \text{ cm}^3$), а затем при разрыве стальной диафрагмы (толщиной 0.3 mm) в открытую атмосферу через цилиндрическое сопло $\varnothing 10 \text{ mm}$. Инициирование детонации заряда ВВ осуществлялось с помощью электродетонатора. Для уменьшения влияния отраженных ударных волн (УВ) генераторы закреплялись на гибкой подвеске на расстоянии не менее 1.5 m от возможных отражающих поверхностей взрывной камеры.

В экспериментах проводились скоростная покадровая (до 300 тыс. кадров в секунду) фоторегистрация (с различных направлений) процесса инжекции плазменной струи в атмосферу, фронтальная видеосъемка и фотоэлектрическая дозиметрия генерируемого оптического излучения в четырех спектральных диапазонах (УФ — $\lambda = 270 \pm 20 \text{ nm}$, „синяя“ — $\lambda = 430 \pm 50 \text{ nm}$, „зеленая“ — $\lambda = 555 \pm 50 \text{ nm}$ и ближняя ИК — $\lambda = 1000 \pm 70 \text{ nm}$ области спектра). Интегральный выход излучения в полосе прозрачности воздуха измерялся калиброванным пироэлектрическим датчиком.

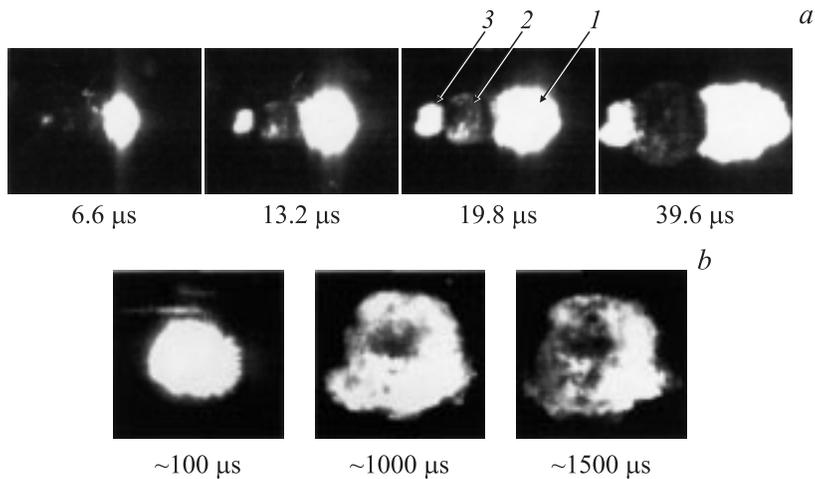


Рис. 1. Характерные кадры скоростной фотосъемки процесса истечения плазмы в атмосферный воздух: *a* — боковая съемка, поле кадра — 30×40 см; заряд „А“: 1 — основная плазменная струя, 2 — расширяющиеся продукты детонации, 3 — плазменная струя, истекающая со стороны электродетонатора; *b* — фронтальная съемка, поле кадра — 60×60 см; заряд „В“.

На рис. 1 представлены характерные скоростные фотографии процесса импульсного истечения плазмы в атмосферу.

В начальной стадии процесса торможения струи образуется нехарактерное для газодинамического истечения из сопла плазменное образование в виде эллипсоида вращения, причем большая ось эллипсоида направлена поперек основного вектора скорости потока. Максимальные скорости расширения плазмы наблюдаются в первые микросекунды ($1-3 \mu\text{s}$) процесса истечения и превышают 10 km/s . Так, для заряда „А“ средние за первые $6-7 \mu\text{s}$ истечения скорости расширения плазмы в радиальном и осевом направлении составили ~ 8.1 и 10.5 km/s соответственно. В связи с этим к этому моменту времени (моменту времени, близкому к первому максимуму излучения) диаметр тела свечения составляет $\sim 11 \text{ cm}$ и продольный размер $\sim 7 \text{ cm}$. С увеличением массы вещества в конической выемке заряда ВВ начальные

скорости расширения и размеры тела свечения в максимуме излучения уменьшаются.

Формирование в начальной стадии истечения плазменного образования в виде сплюснутого в осевом направлении эллипсоида вращения указывает на существенную роль поперечного растекания плазменного потока. При наличии осевого движения струи это приводит к формированию характерной грибовидной конфигурации течения, состоящей из центральной струи, ее головной части — области ударного торможения („шляпка гриба“) и окружающей плазменной пелены [3]. Высокоскоростное осевое движение шляпки гриба создает разреженность в ее полости, возникают обратное движение и завихренность плазменной пелены. Эта завихренность плазмы приводит в дальнейшем к формированию циркуляции тороидального вихря.

Наиболее резкое торможение струи наблюдается в первые $10 \mu\text{s}$ процесса. К $20 \mu\text{s}$ осевая скорость падает до $\sim 4 \text{ km/s}$, радиальная — до $\sim 0.7 \text{ km/s}$, тело свечения приобретает сферическую форму, а затем вытягивается в направлении движения струи. Разрушение корпуса генератора и радиальный разлет продуктов детонации и осколков начинается практически одновременно с истечением плазменной струи, что может указывать на значительное (негативное) влияние эффектов разгрузки на эффективность передачи энергии ВВ в плазму. Характерно, что скорость радиального разлета продуктов детонации (на $20 \mu\text{s}$ процесса $\sim 2 \text{ km/s}$) заметно превышает скорость радиального расширения плазменной струи.

К $\sim 100 \mu\text{s}$ диаметр плазменного образования составляет $D \approx 25 \text{ cm}$ (варианты „А“ и „В“) и 23 cm (заряд „С“); скорости радиального расширения падают до $500\text{--}600 \text{ m/s}$. Усредненный закон радиального расширения по различным модификациям зарядов описывается степенной функцией $D(\text{cm}) \sim 2.4t^{0.48}$, t в μs . Начиная с $\sim 100 \mu\text{s}$ расширение плазменного облака замедляется и описывается уже степенной зависимостью с показателем ~ 0.26 (до $\sim 1.5 \text{ ms}$), что свидетельствует о смене режимов газодинамического течения и может косвенно указывать на завершение процессов формирования плазменного тороидального вихря [3]. Примерно к $1\text{--}1.5 \text{ ms}$ процесса диаметр светящегося плазменного образования, регистрируемый на скоростных фотографиях, стабилизируется на уровне $\sim 50 \text{ cm}$. На кадрах скоростной фотосъемки в этот период отчетливо просматриваются тороидальные вихревые структуры с выраженной турбулентностью и азимутальными гидродинамическими

неустойчивостями (рис. 1, *b*). На видеокдрах свечение плазменного облака регистрируется в течение 40–80 ms с характерными размерами 50–100 см, после чего в течение 100 . . . 200 ms фиксируются светящиеся треки догорающих частиц алюминия.

Временная структура импульса излучения включает две компоненты — быструю и медленную. Быстрая компонента наиболее выражена у зарядов с малой массой вещества в кумулятивной выемке (модификации „А“ и „В“) и обусловлена ударным торможением головной, наиболее высокоскоростной части струи. Полная длительность процессов ударного торможения струи составляет 40 μ s. Максимум импульса УФ-излучения наблюдается на 6–7 μ s истечения и соответствует яркостным температурам 6.5 . . . 6.7 kK. Максимум силы излучения в видимом диапазоне достигается на $\sim 17 \mu$ s, что связано с конкуренцией процессов охлаждения и расширения плазмы. Яркостные температуры к этому моменту времени в УФ- и видимой областях составляют 5.5–5.8 kK. Регистрируемые температуры излучения в ближней ИК-области несколько меньше (на ~ 1000 K). К $\sim 40 \mu$ s яркостные температуры уменьшаются до ~ 4 kK, и в дальнейшем темп их снижения значительно замедляется. Длительность световых импульсов на полувысоте $\sim 20 - 25 \mu$ s. При заполнении конической выемки пористым алюминием или Al-пудрой скорости истечения падают, соответственно уменьшаются яркостные температуры и мощность излучения — максимальные регистрируемые температуры излучения составляют ~ 5 kK. Максимальные значения силы света (~ 14 Mcd) и силы излучения (~ 150 kW/sr) быстрой компоненты достигались для заряда с облицовкой Al-фольгой, соответствующие характеристики для заряда „С“ примерно в 3 раза меньше.

Медленная компонента импульса излучения связана с крупномасштабными вихревыми структурами, образующимися при торможении головной части струи и ее радиальном (поперечном) растекании. В вихревое (циркуляционное) движение вовлекаются мелкодисперсные капли алюминия, которые, окисляясь кислородом воздуха, способствуют продолжительному (~ 5 ms) поддержанию температуры на сравнительно высоком уровне $\sim 3.0 - 3.2$ kK. Существенным здесь может оказаться и установленный в [2] эффект анизотропии процессов переноса (диффузии и теплопроводности) в поле центробежных сил во вращающейся плазме.

На рис. 2 приведены рассчитанные по измеренным температурам излучения и геометрическим размерам тела свечения временные за-

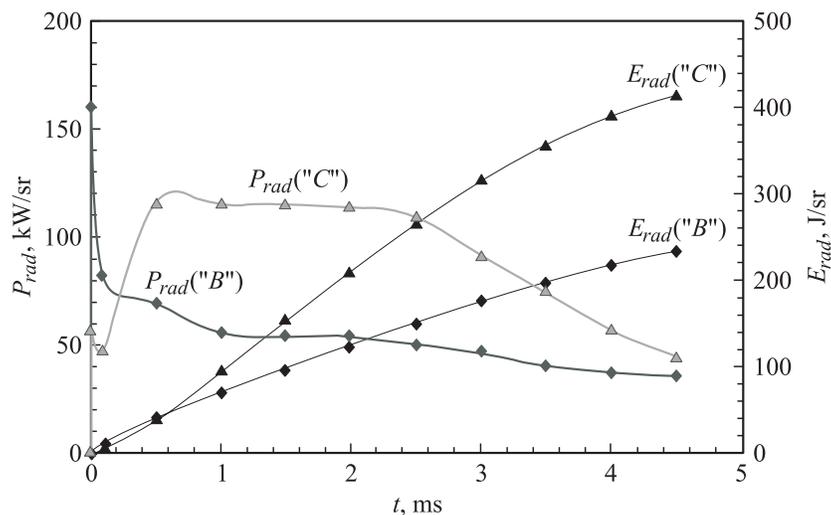


Рис. 2. Временные зависимости интегральной по спектру мощности (P_{rad}) и энергии (E_{rad}) излучения для модификаций зарядов „B“ и „C“.

висимости угловых плотностей интегральных по спектру мощности и энергии излучения для двух модификаций зарядов „B“ и „C“. Максимальный выход излучения в медленной фазе процесса достигается при заполнении кумулятивной выемки заряда Al-пудрой — мощность излучения составляет ~ 120 kW/sr, энергия ~ 420 J/sr. Полная, излучаемая за время ~ 4.5 ms энергия (~ 5 kJ) соответствует эффективности преобразования энергии ВВ в излучение $\sim 4\%$. Энергетические характеристики медленной компоненты излучения для зарядов „B“ и „A“ оказались ниже в ~ 2 и ~ 4 раза соответственно.

Таким образом, проведенные исследования показали, что привлечение новых радиационно-газодинамических эффектов, связанных с самоорганизованными вихревыми течениями плазмы, является весьма продуктивным направлением повышения энергетических характеристик взрывных источников излучения. С помощью сравнительно малогабаритных взрывных генераторов плазмы в атмосферном воздухе получены долгоживущие плазменные образования с большой излучающей поверхностью (~ 1 м²) и полным выходом оптического излучения на

уровне нескольких процентов от запасаемой химической энергии ВВ. Генерируемый импульс излучения включает компоненты микро- и миллисекундных диапазонов длительностей.

Список литературы

- [1] *Энциклопедия* низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Физматлит, 2005. Т. XI-4. С. 593–600.
- [2] Юсупалиев У. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 543–559.
- [3] Камруков А.С., Кожевников И.В., Козлов Н.П. // Сб. научных трудов VII Межгос. симпозиума по радиационной плазмодинамике („РПД-2006 “). М.: НИЦ „Инженер“ 2006. С. 137–140.