



# ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю.Подзирей, к.ф.-м.н., Институт ядерных исследований НАН Украины

Рассмотрена возможность перевода газодинамического лазера (ГДЛ) на продуктах сгорания в импульсный режим за счет пульсаций активной среды. Показано, что использование топливного цикла детонационного сгорания топлива приводит к большей инверсионной заселенности уровней. Это позволяет выполнить в транспортабельном варианте ГДЛ, совмещающий высокую среднюю и пиковую мощности.

**И**спользование в современных промышленных конструкциях больших объемов металла оборачиваются массой металлического лома, поступающего на переработку при выводе этой продукции из эксплуатации. Грамотная утилизация металлического лома позволяет, снижая нагрузку на рудные месторождения, вернуть металл в промышленный оборот. При этом импорт металлического лома является статьей доходного бизнеса во многих странах мира. Согласно прогнозам, количество металлических изделий, подлежащих переработке, будет постоянно расти в ближайшие годы. Так, например, ожидается, что число крупнотоннажных судов, предназначенных для отправки на металлолом, возрастет до 3000 единиц в год. В некоторых особых случаях вывода металлических конструкций из эксплуатации возникают проблемы обеспечения безопасности работающего персонала. Эти проблемы существуют при утилизации элементов атомных электростанций, списанных судов с ядерными энергетическими установками, судов атомного технологического обслуживания – их утилизацию желательно осуществлять дистанционно. Да и в других индустриальных областях, где необходимо постоянно выводить из эксплуатации крупногабаритное технологическое оборудование, утилизация конструкций предполагает демонтаж и фрагментирование на части, удобные для погрузки и транспортировки, или фрагментирование на месте.

Эффективным средством дистанционного разрушающего воздействия на материал являются мощные импульсно-периодические (И-П) промышленные лазеры на основе  $\text{CO}_2$  с высокочастотной накачкой. Однако их мощность ограничена допустимым объемом активной среды. Они массивны, имеют сложную систему питания, охлаждения и газоснабжения, занимают значительные объемы.

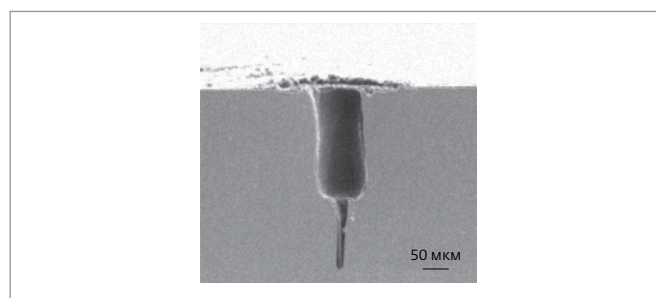
Другое дело – лазеры с тепловой накачкой на продуктах сгорания и с открытым газодинамическим циклом. В отличие от лазеров с высокочастотной накачкой они не имеют принципиальных ограничений по объему активной среды. Такие лазеры предельно просты, однако у них низкий КПД, они генерируют пучок в непрерывном режиме и занимают значительные объемы при своих больших размерах: длина оптических резонаторов может достигать 200 м при мощностях более 100 кВт. С энергетической точки зрения использование для обработки материала И-П режима намного лучше непрерывного. Новые возможности для обработки материала создаст перевод лазеров с тепловой накачкой на продуктах сгорания в импульсный режим и повышение их КПД при сохранении средней мощности.

Если плотность мощности импульса на образце превышает порог абляции, то происходит микровзрыв. Он сопровождается образованием кратера

на поверхности образца и появлением светящейся плазмы вместе с разлетающимися частицами. В данное время подобный процесс реализуется твердотельными лазерами с большой пиковой мощностью. Такие твердотельные лазеры нашли применение в микрообработке поверхностей, маркировке изделий, скрайбировании, термо-раскалывании, сверлении микроотверстий, лазерно-индуцированном химическом травлении. Однако возможность использовать их для разделки конструкций для последующей утилизации исключена из-за низкого уровня средней мощности, не превышающей на практике 100 Вт.

В работе [1] исследованы процессы абляционного формирования каналов в стали импульсами Nd-лазеров пикосекундной и наносекундной длительности. Для достаточно глубоких аблированных каналов отмечается значительное экранирование падающей энергии излучения (до 80–90%), вызванное пробоем содержащего аблированные микрочастицы воздуха (рис.1). Было показано, что уже незначительное разрежение воздушной среды до уровня 300–400 мбар позволяет избежать низкопорогового пробоя и вызываемого им эффекта экранирования. Эксперименты, проведенные на воздухе, показали, что в случае абляции с высокой частотой повторения импульсов (порядка нескольких килогерц) в аблированной области реализуются условия, эквивалентные "вакуумным". То есть такие рабочие параметры обеспечивают условия, в которых экранировка продуктами абляции практически отсутствует.

Для перевода газодинамических лазеров с тепловой накачкой в импульсный режим существуют известные методы модуляции добротности [2]. Они предполагают использовать в составе резонатора активное заднее зеркало или обеспечить самоинжекцию лазерного излучения за счет отвода его части из резонатора. Трансформация временной и пространственной структуры излучения осуществляется при помощи дискового модулятора или с помощью модулятора на основе адаптивного зеркала. Отведенная часть ИК-излучения возвращается в резонатор, основной лазерный пучок при этом модулируется по мощности и приобретает требуемое фазовое распределение. Были разработаны малослойные биморфные адаптивные зеркала на основе карбида кремния, способные работать на частотах в десятки килогерц. Однако оказалось, что они имеют ограничения по ресурсу, возникающие из-за комбинированной механико-термической нагрузки. В случае использования дискового модулятора при отводе необходимой части



**Рис.1.** Поперечное сечение канала, сформированного в стали импульсами длительностью 300 пс при плотности энергии 75 Дж/см<sup>2</sup> [1]

ИК-излучения края щели могут деформироваться и оплавиться.

Было предложено [3] создавать пульсирующую активную среду лазера за счет высокочастотного выхлопа (до 30 кГц) резонансного пульсирующего детонационного двигателя (ПудД) [4] в его линейном варианте. Обеспечить высокую частоту выхлопа можно исключением из конструкции впускных и выпускных клапанов и предварительным разложением топлива на компоненты, имеющие взрывной характер горения. В ПудД реализован наиболее экономичный топливный цикл, близкий к циклу при  $V = \text{const}$ . В качестве топлива удобно использовать бензол  $C_6H_6$  в смеси с закисью азота  $NO_2$ . Это позволит получить состав активной среды лазера, близкий к оптимальному [5]. Саму закись азота удобно хранить в баллонах, так как при давлении 50 атм вещество переходит в жидкое состояние. Бензол и его летучие гомологи образуют с воздухом и закисью азота легко взрывающиеся смеси. Для обеспечения сверхзвуковой скорости истечения продуктов горения, необходимой для поддержания стабильности активной среды, не требуется применять сопло Лавалю. Сажа и другие соединения, снижающие эффективность работы лазера, в таком выхлопе отсутствуют.

Такты ПудД показаны на рис.2. Соударение радиальных сверхзвуковых струй (СЗС) еще холодной смеси, поступающей в резонатор, вызывает образование ударной волны (УВ), которая движется к донной полости резонатора, отражается от нее и фокусируется в центре резонатора в области, именуемой "фокусной линией". В этой области вследствие эффекта Гартмана – Шпренгера происходит местное повышение температуры и давления, достаточное для воспламенения ТВС. Возникает детонационное горение. Из-за выгорания топлива резко повышаются давление и температура продуктов сгорания, а детонационная волна сгорания

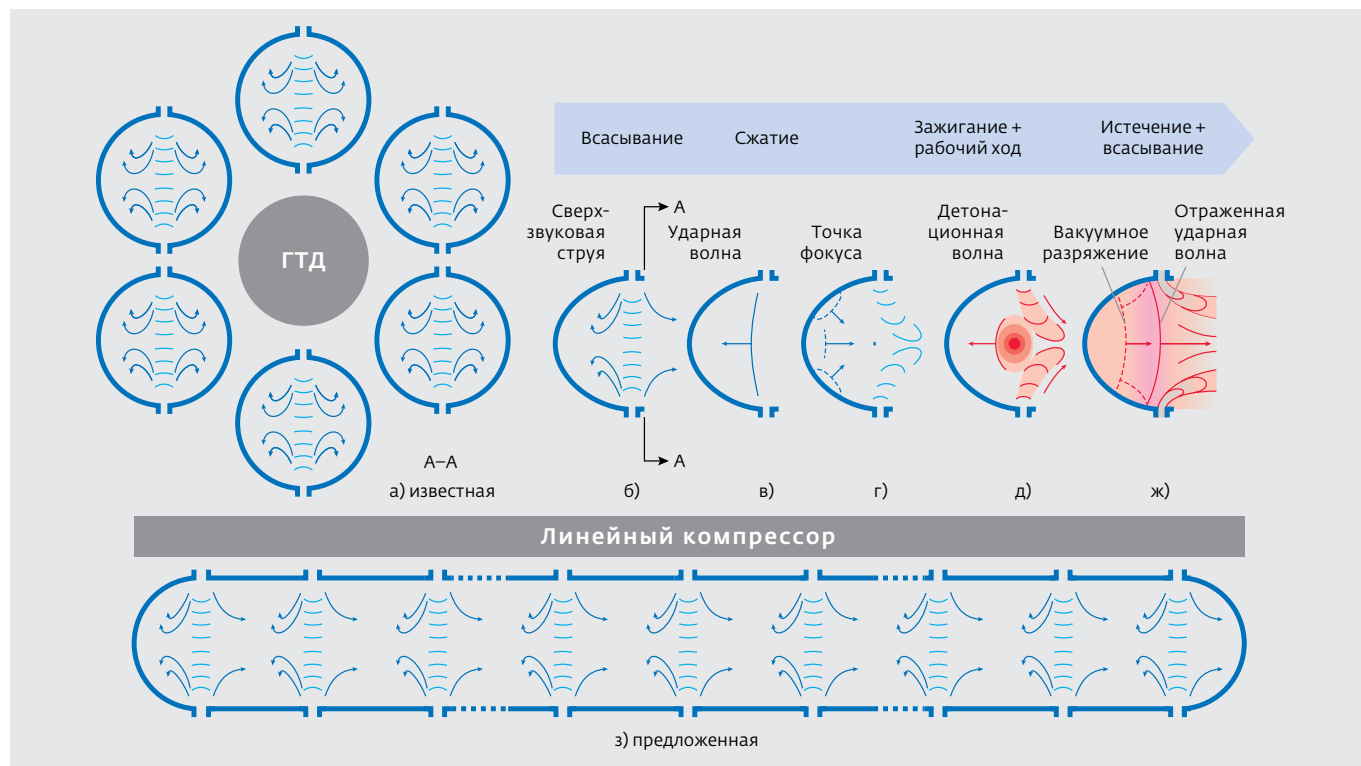
трансформируется в отраженную ударную волну (ОУВ). ОУВ с огромной скоростью устремляется в сопловое устройство, увлекая за собой продукты сгорания и создавая в тепловом резонаторе разряжение, необходимое для последующего такта. Частота пульсаций определяется геометрическими параметрами теплового резонатора, который обычно выполняется в виде полусферы. Для его наддува используется минимизированный по тяге ГТД с осевым компрессором, работающий как генератор сжатого воздуха. Он создает кольцевую струю. Такая геометрия удобна, если генератор газа рассматривается как источник тяги для летательного аппарата. Это минимизирует лобовое сопротивление. Тепловые резонаторы располагаются по окружности вокруг ГТД (см. рис.2).

Для создания активной среды в оптическом резонаторе лазера необходимо иметь плоскую струю газа. Такую струю может обеспечить тепловой резонатор линейной, полуцилиндрической формы. Соответственно все остальные механизмы, – генератор сжатого воздуха, химический реактор разложения топлива, каналы подвода топливно-воздушной смеси, – также должны быть выполнены в линейном виде. Конструкция генератора сжатого

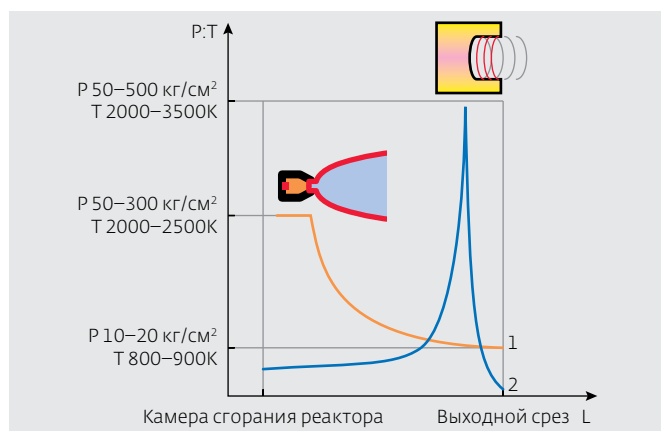
воздуха (компрессора) на основе поперечно-поточного нагнетателя, создающего плоскую струю сжатого воздуха, была впервые предложена в работе [6].

Для сравнения на рис.3 представлен качественный график изменения температуры и давления по оси камеры сгорания стандартного газотурбинного двигателя (ГТД), который обычно используется для лазера с тепловой накачкой, и теплового резонатора ПуДД.

Кривая 1 постоянна во времени, а кривая 2 отражает максимальное и минимальное значения давления, возникающего в течение последнего такта, представленного на рис.2. Температура сгорания в тепловом резонаторе 3 (рис.4) выше, чем в камере сгорания обычного ГТД, что приводит к большей заселенности верхних квантовых уровней, а температура на срезе резонатора, вследствие большего расширения рабочего газа, ниже и близка к той, которая необходима для создания малой заселенности нижнего квантового уровня. Большая скорость охлаждения снижает вероятность релаксации верхнего уровня. Эти обстоятельства позволяют надеяться на повышение лазерного КПД. Более высокое давление в тепловом резонаторе обеспечивает большую



**Рис.2.** Принцип создания пульсирующей активной среды лазера: а – известная форма теплового резонатора; б, в, г, д, ж – схема тактов работы пульсирующего генератора газа с детонационным сгоранием топливовоздушной смеси (ТВС); з – предложенная форма теплового резонатора



**Рис.3.** Давление и температура камеры сгорания обычного ГТД (1) и теплового резонатора (2) (данные НТЦ Имплаз)

скорость прокачки газа через оптический резонатор, что повышает среднюю мощность лазера.

Андерсон в своей фундаментальной работе [7] рассматривал возможные параметры высокотемпературных газодинамических лазеров третьего поколения с начальной температурой до 3000K. Он указал на существование возможности достичь значений запасенной энергии ~120 кДж/кг и на возникновение при этом проблемы термостойкости ряда узлов лазера. Для ПудД температура 3000K в такте "рабочий ход" является ординарной. Если учесть, что обычно в газовых лазерах на продуктах сгорания энергия, излучаемая на единицу массы сжигаемой смеси (уд. энергия излучения), - 20 кДж/кг, то появится возможность значительного сокращения длины оптического резонатора. Это позволит разместить на стандартной транспортной базе лазерный комплекс с достаточной средней и пиковой мощностью для утилизации конструкций.

Гипотетическая схема такого лазера на основе резонансного пульсирующего двигателя

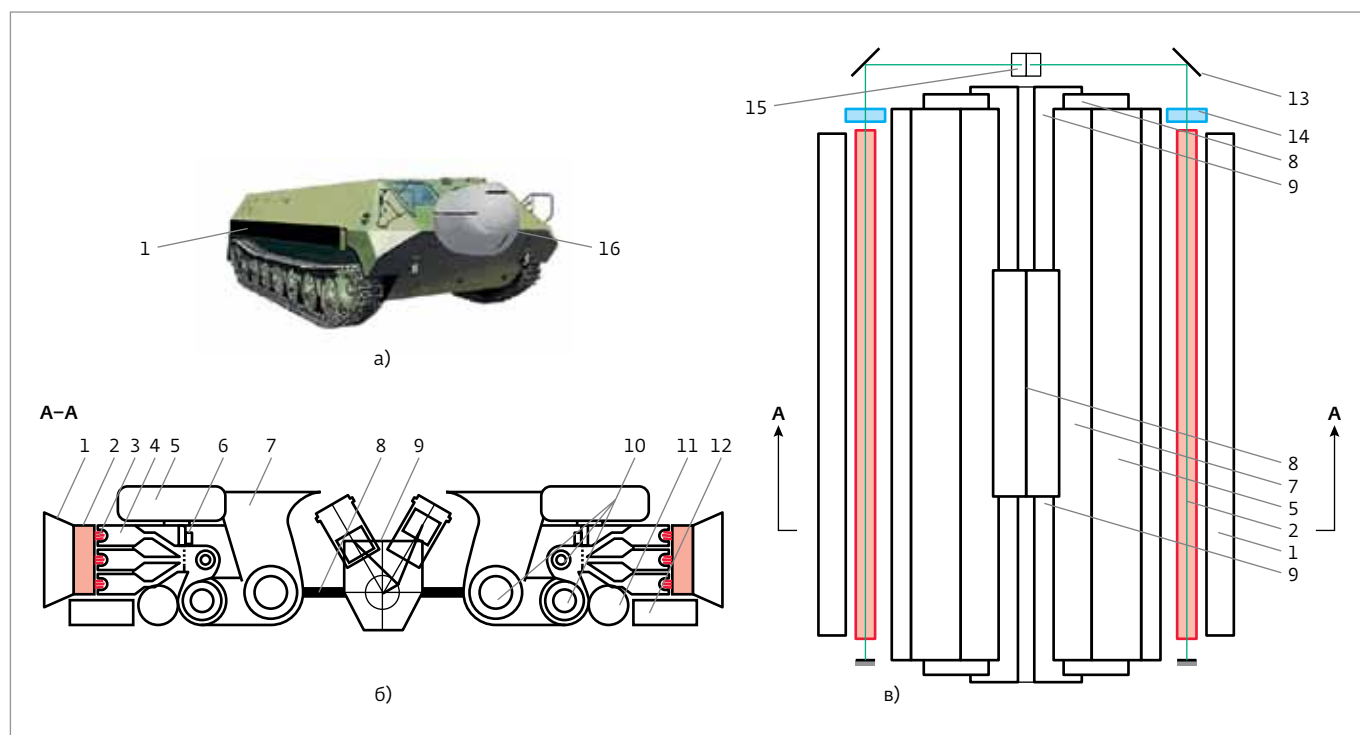
и его возможный вид в транспортабельном варианте представлены на рис.4. Сверхзвуковой импульсный CO<sub>2</sub>-лазер с открытым газодинамическим циклом в предлагаемом варианте будет работать следующим образом. От поршневого двигателя 9 через трансмиссию 8 роторам поперечно-поточного нагнетателя 10 придается вращательное движение. Для снижения веса комплекса можно использовать турбовальный двигатель. Атмосферный воздух через щелевой воздухозаборник 7 попадает в первое колено воздухопровода, где захватывается лопатками ротора поперечно-поточного нагнетателя. Образуемое при этом диаметрально течение, обтекая возникший внутри ротора вихрь, сдвинутый направляющим аппаратом, и, проходя статорные лопатки (на рис. 4 не показаны), совершает поворот на угол более 90°. Посредством "языка", являющегося частью воздухопровода, сжатый воздух направляется последовательно во второе и третье колено, где дополнительно сжимается аналогичным образом. Перемещение заслонки 6 обеспечивает постоянство давления наддува в химическом реакторе 4, где обогащенная смесь бензола, его гомологов и воздуха нагревается, разлагается на менее сложные легкие компоненты в условиях недостатка последнего, смешивается с дополнительным воздухом и поступает вместе с закисью азота из баллонов 11 в тепловой резонатор 3, а затем - в оптический резонатор 4. Индуцированное ИК-излучение, отражаясь от зеркал 13 и 14, имеющих постоянную геометрию, через призму 15 выводится на фокусирующую систему 16. Вместо полупрозрачных зеркал 14 можно использовать перфорированные [8], которые обладают более высокой прочностью и лучевой стойкостью. После прохождения оптического резонатора газ через диффузор 1 выбрасывается в атмосферу.

Анализ литературы показал, что имеется крайне ограниченное число публикаций, в которых

сообщается о реализации импульсного режима работы мощных промышленных лазеров. При этом данный режим реализовывался за счет драматического снижения выходной мощности – в 100 раз для CO<sub>2</sub>-лазеров. Этот показатель удалось снизить до полутора раз в эксперименте, о котором сообщалось в работе [2]. Для предлагаемой конструкции лазера такое сравнение не корректно – непрерывный режим в нем невозможен, а импульсный режим является его органической сущностью. Рассмотренный импульсный сверхзвуковой CO<sub>2</sub>-лазер повышенной мощности, с управлением пучком по заданной программе, можно также использовать в заводских условиях для порезки материалов с значительным коэффициентом отражения и высокой теплопроводностью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Климентов С.М., Таранов С.В., Колосов В.И., Кононенко Т.В. и др. Роль низкорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами. – Труды института общей физики им.А.М. Прохорова, 2004, т. 60.
2. Аполлонов В.В., Кийко В.В, Кислов В.И., Суздальцев А.Г., Егоров А.Б. Высокочастотный импульсно-периодический режим генерации в мощных широкоапертурных лазерах. – Квантовая электроника, 2003, т.33, №9.
3. Подзирей Ю.С. Мобильный технологический комплекс для дистанционной обработки радиоактивных отходов. – Авиационно-космическая техника и технология, 2011, №4 (81).
4. Нечаев Ю.Н., Тарасов А.И. Пульсирующий детонационный двигатель – новый тип двигателя для авиации. – Полет, 2000, № 4.
5. Аблеков, В.К. Денисов Ю.Н., Любченко Ф.Н. Справочник по газодинамическим лазерам. –М.: Машиностроение, 1982.
6. Подзирей Ю.С. Двигатели и двигатель противопожарной летающей платформы – Пожаровзрывобезопасность, 2010, № 2 (19).
7. Андерсон, Дж. Газодинамические лазеры: введение. – М.: Мир, 1979.
8. Борейшо А.С, Леонов А.Ф., Страхов С.Ю., Трилес А.В. Особенности формирования излучения в резонаторах с перфорированными зеркалами. – Квантовая электроника, 2003, т. 33, №2.



**Рис.4.** Технологический лазерный комплекс в мобильном варианте: а) общий вид; б) схема в поперечном сечении; в) схема в продольном сечении): 1 – диффузор; 2 – оптический резонатор; 3 – тепловой резонатор; 4 – химический реактор разложения топлива; 5 – топливный бак; 6 – механизм управления заслонкой; 7 – щелевой воздухозаборник; 8 – трансмиссия; 9 – поршневой ДВС; 10 – роторы линейного компрессора; 11 – баллоны с NO<sub>2</sub>; 12 – бак бензола; 13 – глухое зеркало; 14 – полупрозрачное зеркало; 15 – поворотная призма; 16 – фокусирующая система