

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Подзирей Ю.С.

Институт ядерных исследований НАН Украины, г.Киев

Ключевые слова: активная среда, порог абляции, газодинамический лазер на продуктах сгорания, квантовый уровень, линейный компрессор, уплотнение из углеродных нанотрубок.

Аннотация. На основе детонационного топливного цикла рассмотрена возможность порезки крупногабаритных металлических конструкций с использованием импульсного газодинамического сверхзвукового CO₂ лазера (ГДЛ). Представлена принципиальная схема газотурбинного двигателя предназначенного для получения пульсирующей активной среды и её подачи в оптический резонатор лазера. Двигатель снабжен трехступенчатым компрессором на основе вакуумного насоса типа «Рутс», создающим плоскую струю сжатого воздуха. Обратные перетекания воздуха, характерные для насосов этого типа, устранены за счет использования уплотнений из вертикально выращенных углеродных нанотрубок. Воздух после второй ступени компрессора разделяется на две части. Одна поступает в тепловой резонатор и далее в оптический резонатор лазера, а вторая в плоскую камеру сгорания газотурбинного двигателя для обеспечения работы компрессора. Самовоспламенение топливной смеси в тепловом резонаторе происходит за счет эффекта Гартмана-Шпренгера. Как следствие, резкое возрастание и резкий спад температуры в процессе детонационного топливного цикла приводит к высокой концентрации заселенных и свободных квантовых уровней в неравновесной активной среде. Показано, что использование детонационного топливного цикла позволяет выполнить мощный высокочастотный импульсный ГДЛ, работающий в режиме превышения порога абляции обрабатываемого материала.

THE USE OF THE DETONATION FUEL CYCLE FOR DESTRUCTION OF METAL CONSTRUCTION

Podzirey Yu.S.

Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, Kiev

Keywords: active medium, ablation threshold, gasdynamic laser based on combustions products, quantum level, linear compressor, carbon nanotube seal.

Abstract. On the based of the detonation fuel cycle, the possibility of cutting large-thickness metal structures is considered. Gas dynamic supersonic CO₂ laser (GDL) is used for this purpose. A schematic diagram of a gas turbine engine designed for supply a pulsating active medium in to the laser optical resonator is presented. The engine is equipped with a three-stage compressor based on the Roots type vacuum pump, which creates a flat stream of compressed air. Return air flows, which is characteristic of pumps of this type, have been eliminated by means of seals from vertically grown carbon nanotubes. The air after the second stage of the compressor is divided into two parts. One of them enters to the thermal resonator and then into the laser optical resonator. The second part of air enters into flat combustion chamber of the gas turbine engine to ensure the operation of the compressor. Self-ignition of the fuel mixture in the thermal resonator occurs by means of the Hartmann-Sprenger effect. As a result, a sharp increase and a sharp drop of temperature during the

detonation fuel cycle leads to a high concentration of free and busy quantum levels in a nonequilibrium active medium. It is shown that the use of a detonation fuel cycle allows one to perform a powerful high-frequency pulsed GDL which operating in the mode of exceeding ablation threshold of cutting materials.

Введение

Утилизация конструкций предполагает их демонтаж и фрагментирование на части удобные для погрузки и транспортировки. Необходимость постоянного вывода из эксплуатации крупногабаритного технологического оборудования имеется в различных областях народного хозяйства и в судостроении особенно. Количество металлоконструкций и подлежащих выводу из эксплуатации крупнотоннажных судов, отправляемых на металлолом растет постоянно. С точки зрения типов судов в 2019 году на утилизацию было отправлено 99 контейнеровозов, 99 танкеров, 94 судна для транспортировки генгрузов, 69 балкеров и 23 буровых платформы. В России в 2019 году было передано на утилизацию всего 5 судов – два в Мурманск, два в Находку и одно в Козьмино. С развитием судостроения в РФ острота данной проблемы будет возрастать. Особо существует проблема вывода из эксплуатации атомных электростанций, списанных судов с ядерными энергетическими установками, судов атомного технологического обслуживания, утилизацию которых желательно осуществлять дистанционно, что возможно с использованием мощных технологических CO₂ лазеров. Перевод лазеров с тепловой накачкой на продуктах сгорания в импульсный режим и повышение их КПД, при сохранении или увеличении средней мощности, создаст возможности порезки толстолистового металла на основе процесса абляции.

Импульсный CO₂ лазер с тепловой накачкой

Основным препятствием для разделки толстолистового материала лазером непрерывного излучения являются пары испаряемого материала, препятствующие глубокому проникновению инфракрасного (ИК) пучка. Использование для обработки материала импульсного режима, при определенных условиях, позволяет автоматически удалять из области разреза продукты испарения.

Обычно для лазерной порезки толстолистового металла на судостроительных верфях применяют дополнительную продувку кислородом, что существенно усложняет технологический процесс. Если плотность мощности импульса превышает порог абляции, то происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися частицами. В данное время подобный процесс реализуется твердотельными лазерами с большой пиковой мощностью. Они используются при микрообработке поверхностей, маркировке изделий, скрайбировании, термо- раскалывании, сверлении микроотверстий, лазерно-индуцированном химическом травлении. Однако из-за низкого уровня средней мощности их невозможно использовать для разделки конструкций. Типичные мощности не превышают 100 Вт.

В работе [1] исследованы процессы абляционного формирования каналов в стали импульсами неодимовых лазеров пикосекундной и наносекундной длительности (рис. 1). Значительная экранировка падающей энергии излучения (до 80-90%), для достаточно глубоких аблированных каналов, вызывается пробоем воздуха, содержащего аблированные микрочастицы. Было показано, что уже незначительное разрежение до уровня 300-400мбар позволяет избежать низкорогового пробоя и вызываемой им экранировки.

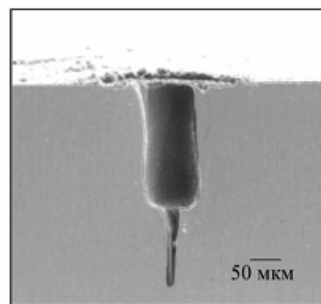


Рис. 1. Поперечное сечение канала сформированного в стали импульсами длительностью 300пс при плотности энергии 75 Дж/см² [1]

Эксперименты, проведенные на воздухе, показали, что в случае абляции с высокой частотой повторения импульсов (порядка нескольких килогерц) в аблированной области реализуются условия, эквивалентные "вакуумным", т.е. таким, при которых экранировка продуктами абляции практически отсутствует.

Для перевода газодинамических лазеров с тепловой накачкой в импульсный режим известные методы модуляции добротности предполагают использование в составе оптического резонатора активного заднего зеркала или самоинжекции лазерного излучения за счет отвода его части из резонатора [2]. Трансформация его временной и пространственной структуры 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 мало - слойные биморфные адаптивные зеркала, на основе карбида кремния, способные работать на частотах в десятки килогерц. Однако они имеют ограничения по ресурсу, вследствие комбинированной механико-термической нагрузки. В случае дискового модулятора при отводе необходимой части ИК излучения, края щели могут деформироваться и оплавляться.

В работе [3] предложено создавать пульсирующую активную среду лазера за счет высокочастотного выхлопа (до 30 кГц) резонансного пульсирующего детонационного двигателя (ПДД) [4]. Высокая частота выхлопа возможна вследствие отсутствия впускных и выпускных клапанов и предварительного разложения топлива на компоненты имеющие взрывной характер горения. В ПДД реализуется наиболее экономичный топливный цикл близкий к циклу при постоянном объеме (V_{const}). Сверхзвуковая скорость истечения продуктов горения необходимая для поддержания стабильности активной среды обеспечивается без применения сопла Лаваля. Сажа и другие различные соединения снижающие эффективность работы лазера в таком выхлопе отсутствуют.

Такты ПДД показаны на рис.2в. Соударение радиальных сверхзвуковых струй еще холодной смеси, поступающей в топливный резонатор, вызывает образование ударной волны, которая движется к донной полости резонатора, отражается от нее и фокусируется в центре резонатора. В этой области вследствие эффекта Гартмана - Шпренгера происходит местное повышение температуры и давления, достаточное для самовоспламенения топливо-воздушной смеси (ТВС). Возникает детонационное горение. Из-за выгорания топлива резко повышаются давление и температура продуктов сгорания, а детонационная волна сгорания трансформируется в отраженную ударную волну.

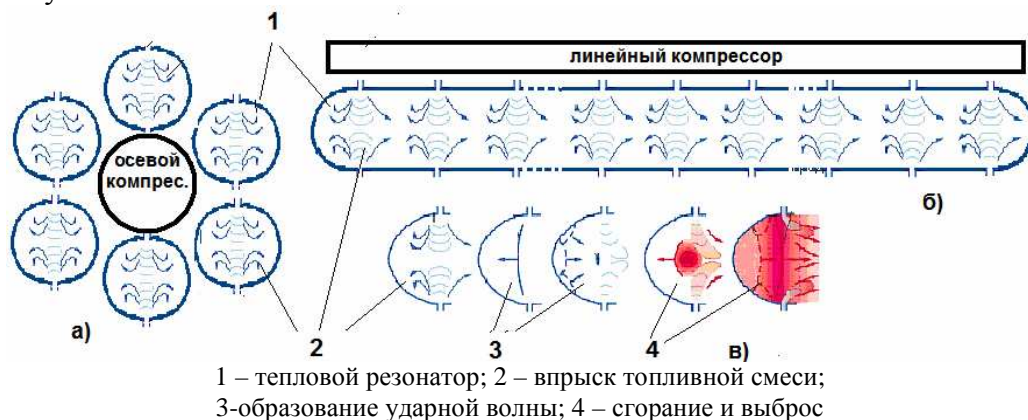


Рис. 2. Схема интеграции теплового резонатора с компрессором:

а) осевой; б) линейный; в) такты детонационного сгорания топливной смеси

С огромной скоростью она устремляется в сопловое устройство, увлекая за собой продукты сгорания и создавая в тепловом резонаторе разрежение необходимое для последующего такта. Частота пульсаций определяется геометрическими параметрами теплового резонатора, который обычно выполняется в виде полусферы. Для его наддува используется минимизированный по тяге газотурбинный двигатель (ГТД) с осевым компрессором, работающий в основном как генератор сжатого воздуха. Компрессор ГТД создает кольцевую (в сечении) область сжатого воздуха. Часть воздуха отбирается для тепловых резонаторов. Такая геометрия удобна если резонаторы рассматриваются как источник тяги для летательного аппарата. Они располагаются по окружности вокруг ГТД, (рис. 2а). Это минимизирует лобовое сопротивление летательного аппарата (ЛА).

Однако для использования выхлопа как источника активной среды лазера и получения большой средней мощности необходимо иметь плоскую струю газа направленную в вытянутый оптический резонатор. Такую струю может обеспечить тепловой резонатор линейной, полуцилиндрической формы (рис. 2б), в котором понятие фокуса может быть заменено понятием «фокусной линии». Подобная форма теплового резонатора была предложена в работе [5]. Соответственно все остальные механизмы работающие на него, такие как компрессор, камера сгорания, сопло, химический реактор

разложения топлива, каналы подвода топливно-воздушной смеси, также должны быть выполнены в соответствующей геометрии, т.е. в линейном виде.

От вакуумного насоса к линейному компрессору

В основу линейного компрессора может быть положен двухроторный вакуумный насос внешнего сжатия типа «Рутс». Рабочая камера такого насоса образуется корпусом и профильными синхронно вращающимися в противоположных направлениях роторами с гарантированными зазорами.

Наибольшее распространение в вакуумной и компрессорной технике получили машины с роторами, спрофилированными в виде восьмерок (рис. 3а). Значительно реже применяются конструкции с трехлепестковым (рис. 3б) и четырехлепестковым профилями роторов. Бесконтактные роторные насосы, за счет наличия гарантированных зазоров в роторном механизме, обладают высокими частотами вращения и высокими удельными откачными характеристиками, малым износом рабочих органов и позволяют вести откачку агрессивных, взрывоопасных и дорогих газов, парогазовых конденсирующихся смесей и сред, содержащих твердые включения, имеющие размер не более величины минимального зазора в роторном механизме.

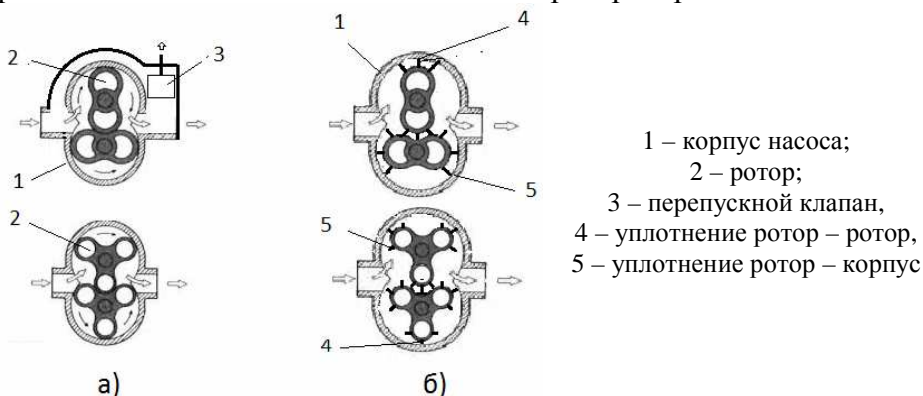


Рис. 3. Схема двухроторного вакуумного насоса типа Рутс:
а) обычный, б) с уплотнениями

Главным недостатком бесконтактных насосов считается низкая степень повышения давления за счет обратных перетеканий через зазоры. При смене вход-выход насос может работать в режиме нагнетателя. Для этих насосов увеличение степени повышения давления достигается, как правило, за счет последовательного соединения нескольких ступеней.

Для наддува ПДД требуется создать давление порядка 30 кПа. Средством увеличения давления на выходе может быть уменьшение обратных перетеканий за счет использования уплотнений из углеродных нанотрубок (УНТ). Они допускают работу при окружных скоростях до 500 м/с, перепаде давления до 2 МПа и температурах до 750 С. Нанотрубки имеют феноменально низкий коэффициент трения – на два порядка ниже чем любая пара обычных материалов. Если предположить, что сила нормального давления составляет 0.01 модуля сдвига, равного для многослойных трубок ~

25 ГПа, то коэффициент трения $\sim 10^{-5}$. Это на два порядка меньше, чем у лучших пар трения в макроскопических твёрдых телах.

На рис. 4 приведена изометрия 3D модели фрагмента ЩУ из УНТ с плотностью 900 щетинок на 1 мм^2 , которую предлагается выполнить путем выращивания вертикально ориентированных УНТ на подложке катализаторе [6]. Пока щеточные уплотнения изготавливаются из пучка микропроволоки (кобальтовый сплав) с плотностью 300 щетинок на 1мм длины.

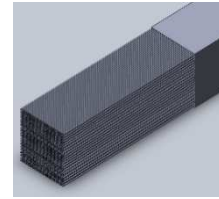
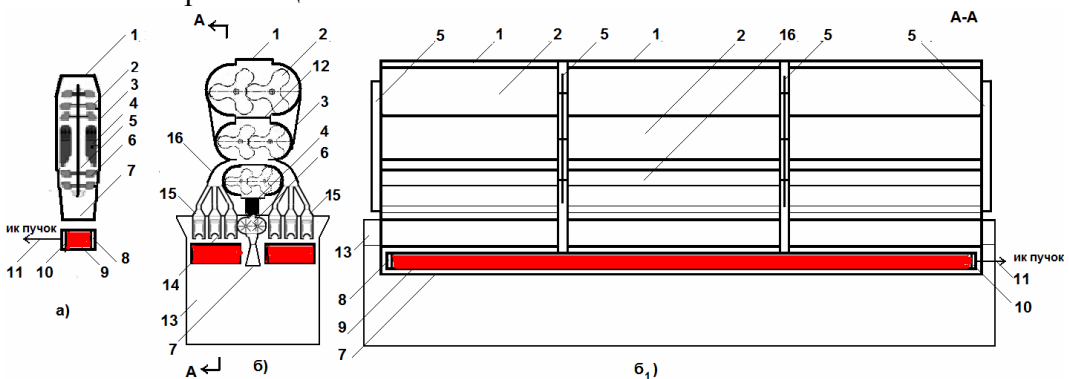


Рис. 4. Щеточное уплотнение из УНТ

Достичь необходимой степени сжатия воздуха позволит также увеличение числа оборотов роторов до 12-15 тысяч и подсоединение дополнительных ступеней к компрессору.

ГТД с компрессором на основе двухроторного нагнетателя

На рис.5а представлена схема мощного промышленного лазера на основе стандартного авиационного ГТД с осевым компрессором. Как правило, используют двигатели, выработавшие свой ресурс на ЛА, что существенно снижает стоимость лазера. Продукты сгорания, образующиеся в камере 4 при температуре $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, после выходе из сопла 7 попадают в оптический резонатор 9. Вследствие их быстрого охлаждения, наряду с заселенными верхними квантовыми уровнями, имеются свободные нижние. Переход электронов между ними индуцирует инфракрасное (ИК) излучение мощностью несколько кВт. В качестве топлива удобно использовать бензол C_6H_6 в смеси с закисью азота NO_2 . Это позволяет получить состав активной среды лазера близкий к оптимальному. Сама закись азота удобна для хранения в баллонах, так как при давлении 500 кПа переходит в жидкое состояние. Бензол и его летучие гомологи образуют с воздухом и закисью азота легко взрывающиеся смеси



1 – воздухозаборник, 2 – компрессор, 3 – картер, 4 – камера сгорания, 5 – трансмиссия, 6 – газовая турбина, 7 – сопло, 8 – глухое зеркало, 9 – оптический резонатор, 10 – полупрозрачное зеркало, 11 – ифракрасный пучок, 12 – статорные лопатки, 13 – эжектор, 14 – тепловой резонатор, 15 – реактор разложения топлива, 16 – воздуховод

Рис. 5. Принципиальна схема ИК лазера с открытым газодинамическим циклом: а) непрерывного излучения; б) и б1) импульсно-периодического (И-П) излучения

На рис. 5б и 5б₁ представлена схема импульсного лазера на основе интеграции ГТД выполненного в линейной геометрии и пульсирующего детонационного двигателя. Атмосферный воздух через воздухозаборник 1 поступает в компрессор, где после прохождения второй ступени сжимается до 30 -40 кПа и разделяется на две части. Одна из них попадает в третью ступень компрессора и обеспечивает дальнейшую работу ГТД с плоской струей выхлопа, а вторая поступает в воздуховод 16. В реакторе 15 воздух смешивается с топливом, которое разлагается на простые компоненты имеющие взрывной характер горения. Вследствие колебательных процессов (рис.2в) топливная смесь сжимается в резонансном режиме 120-150ед. и сгорает в тепловом резонаторе 14. Эжектор 13 в совокупности с соплом 7 позволяет осуществить эффективную откачку отработанной активной среды лазера в атмосферу. Поскольку мощность лазера увеличивается с увеличением скорости откачки активной среды то, в некоторых случаях, практикуют откачку с использованием дополнительных форвакуумных насосов.

На рис.6 представлен сравнительный качественный ход температуры и давления по оси камеры сгорания стандартного ГТД, который обычно используется для лазера непрерывного излучения с тепловой накачкой, и теплового резонатора ПДД. Кривая 1 постоянна во времени, а кривая 2 отражает максимальное и минимальное давление возникающее в течении последнего такта, представленного на рис.2в. Температура сгорания в тепловом резонаторе 14 (рис.4) существенно выше, чем в камере сгорания обычного ГТД - 4 , что приводит к большей заселенности верхних квантовых уровней, а температура на срезе резонатора, вследствие большего расширения рабочего газа, ниже и близка к комнатной, что создает малую заселенность 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 скорость прокачки газа через оптический резонатор, что повышает среднюю мощность лазера.

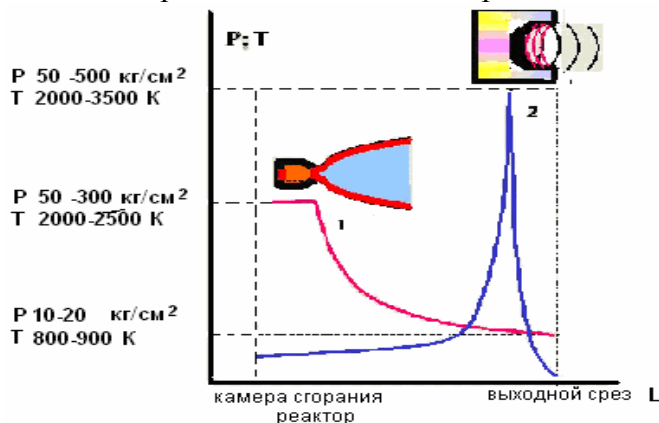
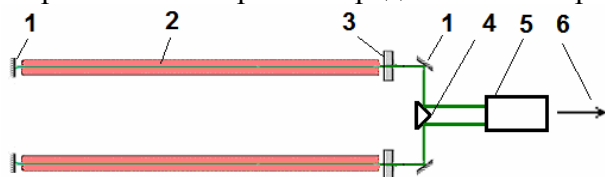


Рис. 5. Давление и температура камеры сгорания обычного ГТД (1) и теплового резонатора 2 (www.implas.ru/material.html)

Рассматривая возможные параметры высокотемпературных газодинамических лазеров третьего поколения с начальной температурой до 3000 К, Андерсон в своей фундаментальной работе [7] указал на возможность достижения значения запасенной энергии ~ 120 кДж/кг и на возникающие при этом проблемы термостойкости ряда узлов лазера. Для ПДД температура 3000К в такте «рабочий ход» является ординарной. При этом, продукты сгорания, в момент достижения максимальной температуры, не касаются стенок теплового резонатора вследствие фокусировки. Если учесть, что обычно в газовых лазерах на продуктах сгорания энергия, излучаемая на единицу массы сжигаемой смеси (уд. энергия излучения) - 20 кДж/кг, то появляется возможность значительного сокращения длины оптического резонатора и размещения лазерного комплекса с повышенной средней и пиковой мощностью на стандартной транспортной базе.

Гипотетическая схема лазера на основе резонансного пульсирующего двигателя в транспортабельном варианте представлены на рис.6.



1 – глухое зеркало; 2 – оптический резонатор; 3 – полупрозрачное зеркало;
4 – поворотная призма; 5 – фокусирующая система; 6 – ИК пучок

Рис. 6. Схема импульсного сверхзвукового лазера на CO_2 с тепловой накачкой

Средняя мощность лазера будет определяться производительностью компрессора, числом тепловых резонаторов, эффективностью охлаждения фокусирующей системы и может достигать значений 700-1000 кВт.

Заключение

Применение детонационного топливного цикла для импульсной накачки CO_2 лазера позволит на порядок повысить его среднюю мощность и осуществлять, в заводских условиях или условиях сухого дока, порезку материалов большой толщины, а также материалов имеющих значительный коэффициент отражения и высокую теплопроводность. Замена принятой сейчас лазерно-кислородной резки плавлением [8] резкой с использованием процесса абляции существенно упростит технологический процесс и улучшит его экономические параметры.

Список литературы

1. Климентов С.М., Таранов С.В., Колосов В.И., Кононенко Т.В., Пивоваров П.А., Царькова О.Г., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. Роль низкопорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. 2004. Т. 60. С. 13-29.
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. №9. Т. 33. С. 753-757.

3. Подзирей Ю.С. Возможности лазерно-плазменных технологий для утилизации металлоконструкций. // Фотоника. 2011. №5. С. 44-48. www.photonics.su/files/article_pdf/3/article_3423_427.pdf
4. Нечаев Ю.Н., Тарасов А.И. Пульсирующий детонационный двигатель – новый тип двигателя для авиации // Полет. 2000. №4. С. 13-20.
5. Подзирей Ю.С. Одно из возможных направлений применения пульсирующего детонационного двигателя // Двигатель. 2010. №3(69). С. 22-24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2011_4_7
6. Патент №2567283 РФ. Способ и устройство для получения вертикально ориентированных углеродных нанотрубок / Григорянц А.Г., Шупенев А.Е. – Опубл. 10.11.2015, Бюл. №31.
7. Андерсон Дж. Газодинамические лазеры: введение. – М.: Мир, 1979. – 206 с.
8. Шаймарданов Р. Лазер СО2 гибкое, надежное и испытанное средство // Фотоника. 2011. №5. С. 16-20. http://www.photonics.su/files/article_pdf/2/article_2969_940.pdf

References

1. Klimentov S.M., Taranov S.V., Kolosov V.I., Kononenko T.V., Pivovarov P.A., Tsarkova O.G., Braitling D., Dousinger F. The role of low-threshold air breakdown in the ablation of materials by short laser pulses // Proceedings of the Institute of General Physics n.a. A.M. Prokhorov. 2004. Vol. 60. P. 13-29.
2. Apolonov V.V., Kiako V.V., Kislov V.I., Suzdaltsev A.G., Egorov A.B. High-frequency pulse periodic mode in high-power wide-aperture lasers // Quantum Electronics. 2003. №9. Vol. 33. P.753-757.
3. Podzirey Yu.S. Possibilities of laser-plasma technologies for the utilization of metal structures // Photonics. 2011. №5. P. 44-48. www.photonics.su/files/article_pdf/3/article_3423_427.pdf
4. Nechaev Yu.N., Tarasov A.I. Pulsating detonation engine - a new type of engine for aviation // Flight. 2000. №4. P. 13-20.
5. Podzirey Yu.S. One of the possible areas of application of a pulsating detonation engine // Engine. 2010. №3(69). P. 22-24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2011_4_7
6. Patent №2567283 RU. Method and device for producing vertically oriented carbon nanotubes / Grigoryants A.G., Shupenev A.E. – Publ. 10.11.2015, Bul. №31.
7. Anderson J. Gas-dynamic lasers: an introduction. – M.: Mir, 1979. – 206 p
8. Shaimardanov R. CO2 laser is a flexible, reliable and tested tool // Photonics 2011. №5. P. 16-20. http://www.photonics.su/files/article_pdf/2/article_2969_940.pdf

Сведения об авторах:

Information about authors:

<p>Подзирей Юрий Степанович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, yuri.podzirey@gmail.com</p>	<p>Podzirey Yuri Stepanovitch – candidate of technical sciences, senior researcher, Institute for Nuclear Research of National Academy of Science, Kiev, Ukraine, yuri.podzirey@gmail.com</p>
--	---

Получена 18.07.2020