DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.8.648.661

Сверхзвуковые газовые и химические лазеры: развитие технологий

А. В. Авдеев [3], А. С. Борейшо [1,2], И. А. Киселев [1,2], А. В. Морозов [1,2], А. Е. Орлов [2]

[1] *Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия*

[3] *«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия*

Сверхзвуковые газовые и химические лазеры являются источниками мощного непрерывного излучения с высоким оптическим качеством. Эти качества позволяет использовать такие лазеры в составе автономных мобильных комплексов. Представлен краткий обзор работ по созданию и совершенствованию лазеров, формированию высококачественного излучения, разработки перспективных систем хранения и подготовки рабочего тела, систем восстановления давления.

Ключевые слова: газодинамические CO_2-лазеры (ГДЛ), непрерывные химические лазеры на молекулах HF и DF (HF / DF-НХЛ), химические кислород-йодные лазеры (ХКИЛ)

Статья попоступила: 24.11.2020
Принята к публикации: 04.12.2020

ВВЕДЕНИЕ

С момента появления оптических квантовых генераторов особый интерес всегда вызывали наиболее мощные системы, и сегодня актуальным остается вопрос получения больших плотностей мощности световой энергии на большом расстоянии при достаточно длительном времени воздействия. В настоящее время одними из наиболее мощных источников непрерывного лазерного излучения являются сверхзвуковые газовые и химические лазеры (СГХЛ). К таким лазерам относятся газодинамические CO_2 лазеры (ГДЛ), непрерывные хими-

Supersonic Gas and Chemical Lasers: Technology Development

A. V. Avdeev [3], A. S. Boreisho [1,2], I. A. Kiselev [1,2], A. V. Morozov [1,2], A. E. Orlov [2]

[1] *Baltic State Technical University "VOENMEH" D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia*

[2] *Laser Systems JSC, St. Petersburg, Russia*

[3] *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

Supersonic gas and chemical lasers are sources of powerful continuous radiation with high optical quality. These qualities allow the use of such lasers as part of autonomous mobile complexes. A brief overview of work on the creation and improvement of lasers, the formation of high-quality radiation, the development of advanced storage and preparation systems for the working fluid, and pressure recovery systems is presented.

Keywords: gas-dynamic CO_2 lasers (GDL), continuous-wave chemical lasers based on HF and DF molecules (HF / DF-CWCL), chemical oxygen-iodine lasers (COIL)

Received on: 24.11.2020
Accepted on: 04.12.2020

INTRODUCTION

Since the advent of optical quantum generators, the most powerful systems have always attracted particular interest, and today the question of obtaining high power densities of light energy at a large distance for a sufficiently long exposure time remains topical. Currently, one of the most powerful sources of CW laser radiation are supersonic gas and chemical lasers (SGCL). These lasers include gas-dynamic CO_2 lasers (GDL), continuous-wave chemical lasers based on HF and DF molecules (HF / DF-CWCL), and chemical oxygen-iodine lasers (COIL). SGCL differ from each other in physical principles of operation, the composition of the active medium, and gas-dynamic parameters. However, they have a com-

ческие лазеры на молекулах HF и DF (HF/DF-НХЛ) и химические кислород-йодные лазеры (ХКИЛ). СГХЛ отличаются друг от друга физическими принципами работы, составом активной среды, газодинамическими параметрами. Однако они имеют общую конструктивную схему, а также рабочий процесс с точки зрения газовой динамики имеет много общего: общими являются вопросы смешения сверхзвуковых реагирующих потоков, течения за многосопловыми блоками, восстановления давления в прямоугольных каналах и др.

Возможность получения большой мощности излучения и передача его на большие расстояния, длительное время работы, отсутствие внешних источников энергии, высокая энергетическая эффективность и хорошее оптическое качество луча – все это и сегодня делает актуальным использование СГХЛ в автономных мобильных системах для различных применений [1].

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ CO_2-ЛАЗЕРЫ

Газодинамические CO_2-лазеры на горении получили свое развитие еще в 70–80-е годы прошлого столетия. Лабораторные ГДЛ мегаваттного класса, разработанные в СССР и США, а также 400 кВт американский лазер того же типа вместе с системой управления лучом, установленный на летающей лаборатории ALL (рис. 1) [2], впервые позволили практически проверить и оценить масштабность и сложность технологических проблем создания лазерного оружия.

CO_2-ГДЛ является молекулярным лазером, который работает на вынужденных переходах между колебательными уровнями молекулы углекислого газа (CO_2). Преобразование накопленной энергии активной среды в лазерное излучение происходит в результате экзотермической реакции горения углеводородных горючих с кислородсодержащими окислителями и разгона полученных продуктов сгорания до сверхзвуковых скоростей с помощью сопловых блоков.

Схема CO_2-ГДЛ на продуктах сгорания представлена на рис. 2. CO_2-ГДЛ состоит из системы хранения и подачи компонентов (СХПК), газогенератора, где нарабатывается газовая смесь с высокой температурой и давлением, содержащая в своем составе молекулы CO_2, N_2 и H_2O,

mon design scheme, and the workflow from the point of view of gas dynamics has much in common: the issues of mixing supersonic reacting flows, flow behind multi-nozzle blocks, pressure recovery in rectangular channels, etc. are common.

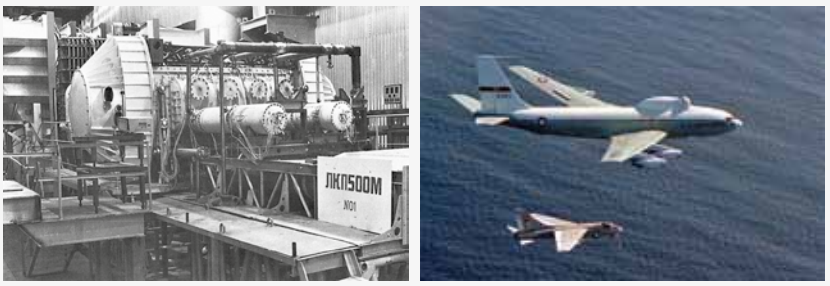
The possibility of obtaining high radiation power and transmitting it over long distances, long operating time, the absence of external energy sources, high energy efficiency and good optical quality of the beam all this makes the use of SGCL in autonomous mobile systems for various applications relevant today [1].

GAS-DYNAMIC CO_2 LASERS

Combustion-driven gas-dynamic CO_2 lasers were developed back in the 70s-80s of the last century. Laboratory GDLs of megawatt class, developed in the USSR and the USA, as well as a 400 kW American laser of the same type, together with a beam control system, installed at the flying laboratory ALL (Fig. 1) [2], for the first time made it possible to practically check and evaluate the scale and complexity of technological problems of creating laser weapons.

CO_2-GDL is a molecular laser that operates on forced transitions between the vibrational levels of a carbon dioxide (CO_2) molecule. The conversion of the accumulated energy of the active medium into laser radiation occurs as a result of the exothermic reaction of combustion of hydrocarbon fuels with oxygen-containing oxidants and the acceleration of the resulting combustion products to supersonic speeds using nozzle blocks.

The scheme of combustion-driven gas-dynamic CO_2 laser is shown in Fig. 2. CO_2-GDL consists of a components storage and supply system (CSSS), a gas generator, where a gas mixture with a high



a) b)

Рис. 1. *Газодинамические CO_2-лазеры на горении: a) – мегаваттный CO_2-ГДЛ; b) – летающая лаборатория ALL*

Fig. 1. *Combustion-driven gas-dynamic CO_2 lasers: a) – megawatt CO_2-GDL; b) – flying laboratory ALL*

соплового блока, состоящего из большого количества плоских сопел, где происходит быстрое охлаждение смеси при газодинамическом расширении, лазерной камеры, оптического резонатора и сверхзвукового диффузора, обеспечивающего выхлоп отработанной среды в окружающую среду.

Однако, большая длина волны (10,6 мкм), а следовательно, высокая расходимость лазерного луча, недостаточно высокая энергетическая эффективность лазерных источников, а также необходимость хранить на борту все компоненты топлива для лазера приводит к тому, что системы на основе CO_2-ГДЛ, способные решать задачи силового воздействия на удаленные объекты, становятся чересчур громоздкими, что не позволяет размещать их на мобильных носителях.

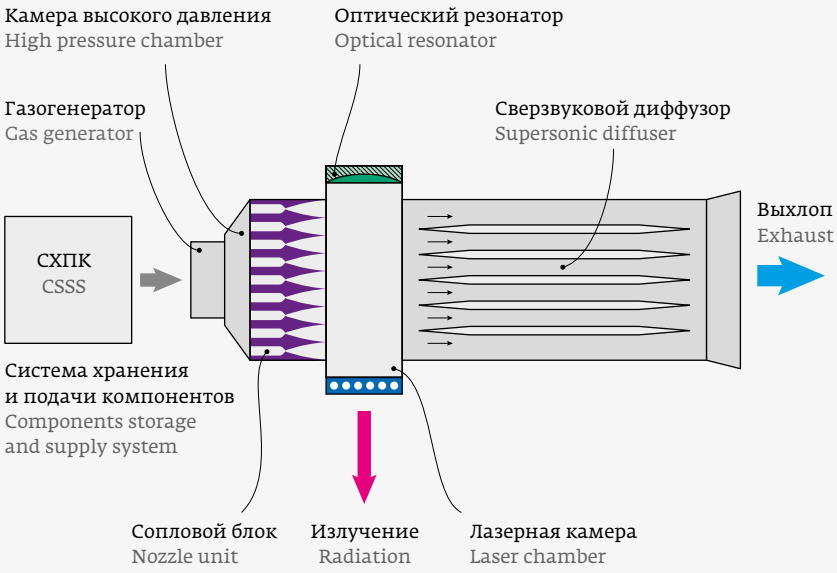


Рис. 2. *Схема CO_2-ГДЛ на продуктах сгорания*
Fig. 2. *The scheme of combustion-driven gas-dynamic CO_2 laser*

Тем не менее, существуют варианты ГДЛ, где в качестве окислителя используется воздух, подаваемый из окружающей среды компрессором авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), где основной по массе (более 95%) компонент топлива берется из атмосферы. Это позволяет существенно сократить систему хранения компонентов, поскольку возимый запас включает в себя только горючее, доля которого в общем расходе не превышает 5%. Такой лазер видится достаточно перспективным для размещения его на летательных аппаратах.

Идеи совмещения ГДЛ с газотурбинными двигателями существовали уже давно и у нас в стране, и за рубежом. Существуют отечественные и зарубежные патенты на внедрение ГДЛ в авиационный двигатель [3–5]. В конце 70-х в нашей стране под руководством академика О. Н. Фаворского был создан первый в мире газодинамический лазер с отбором воздуха от авиационного двигателя Р-38–300 мощностью порядка 180 кВт, непрерывно работающий в течение длительного времени [6]. Это была громоздкая наземная установка.

За все время развития авиационных ГТД с 1950-х до 2010-х годов существенно улучшились их характеристики, влияющие на выходные параметры ГДЛ, такие как давление за компрессором и рабочая температура в камере сгорания. Про-

temperature and pressure is produced, containing molecules of CO_2, N_2 and H_2O, a nozzle block consisting of a large number of flat nozzles, where there is a rapid cooling of the mixture during gas-dynamic expansion, a laser chamber, an optical resonator and a supersonic diffuser, which ensures the exhaust of the spent medium into the environment.

However, the long wavelength (10.6 μm) and, consequently, the high divergence of the laser beam, the not sufficiently high energy efficiency of laser sources, as well as the need to store on board all the components of the fuel for the laser, leads to the fact that systems based on CO_2-GDL capable of solving problems of forceful action on distant objects become too bulky, which does not allow them to be placed on mobile carriers.

Nevertheless, there are variants of the GDL, where air supplied from the environment by the compressor of an aircraft gas turbine engine (GTE) is used as an oxidizer, where the main fuel component (more than 95%) is taken from the atmosphere. This allows you to significantly reduce the storage system of components, since the transportable stock includes only fuel, the share of which in the total consumption does not exceed 5%. Such a laser seems to be quite promising for placing it on aircraft.

The ideas of combining GDL with gas turbine engines have existed for a long time, both in our country and abroad. There are domestic and foreign patents for the introduction of the GDL into

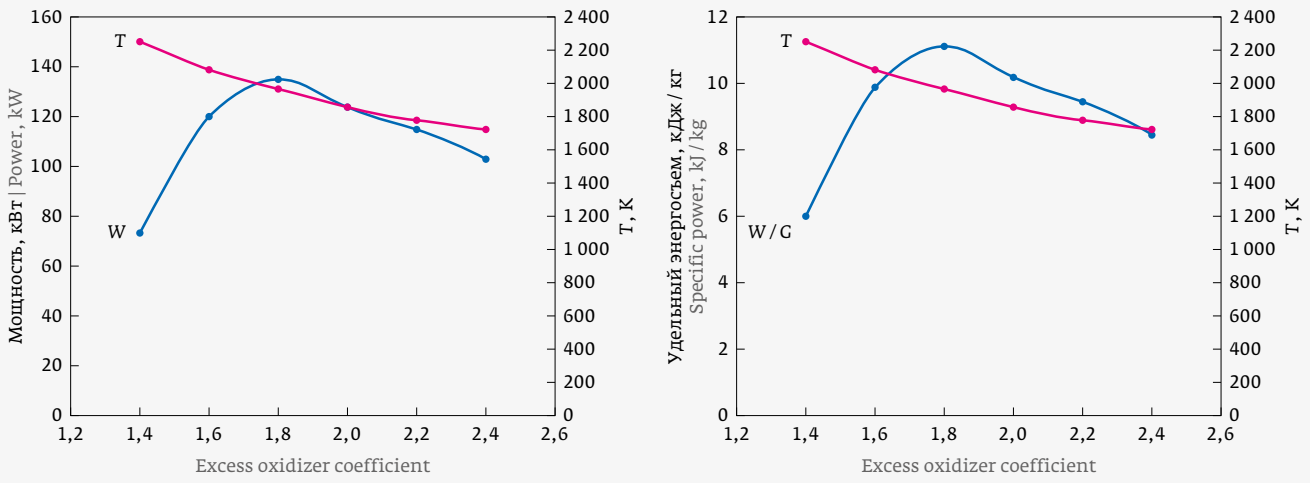


Рис. 3. *Выходные энергетические характеристики ГДЛ для варианта на базе двух самолетных двигателей АЛ-31Ф: a) – мощность; b) – удельный энергосъем*

Fig. 3. *GDL output energy characteristics for the version based on two aircraft engines AL-31F: a) – power; b) – specific energy output*

слеживается неуклонный рост степени повышения давления до значений 30–35 атм и температурного уровня работоспособности материалов до 1200–1250 К, а также повышение рабочей температуры газа до 2000 К. Все это позволяет обеспечить приемлемые энергетические характеристики лазера и создать CO_2-ГДЛ, размещаемый на борту летательного аппарата.

На рис. 3 представлены выходные энергетические характеристики ГДЛ на топливной композиции «керосин-воздух» на базе двух самолетных двигателей АЛ-31Ф [7]. Видно, что при использовании двух двигателей с высокой степенью повышения давления и большим расходом даже при отборе всего 5% воздуха можно получить мощность лазера в неохлаждаемом варианте соплового блока (температура в форкамере лазера не более 1500 К) порядка 80 кВт. При использовании охлаждаемых сопловых лопаток и температуре в форкамере порядка 2000 К мощность можно увеличить до 135 кВт. Общий вид такого лазера представлен на рис. 4.

НЕПРЕРЫВНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ НА МОЛЕКУЛАХ HF И DF

Интерес к HF(DF)-НХЛ связан с возможностью эффективного преобразования внутренней химической энергии веществ в когерентное излучение, минуя другие стадии преобразования. Химический КПД НХЛ значительно превосходит КПД

an aircraft engine [3–5]. In the late 70s, the world's first gasdynamic laser with air extraction from the R-38–300 aircraft engine with a power of about 180 kW was created under the leadership of domestic academician O. N. Favorsky, which continuously operated for a long time [6]. It was a cumbersome ground installation.

Over the entire period of development of aviation GTEs from the 1950s to the 2010s, their char-

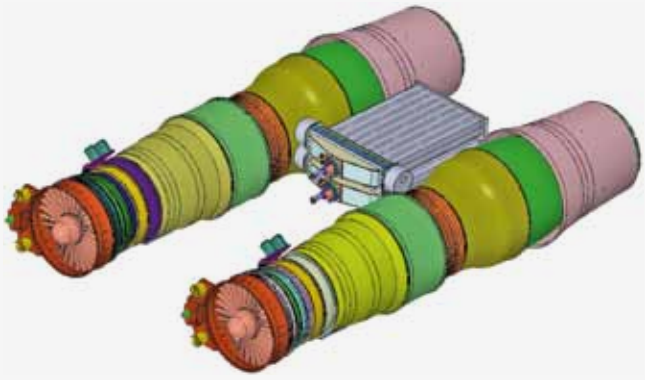


Рис. 4. *Общий вид ГДЛ на смеси «керосин+воздух» с отбором компонентов от двух двигателей типа АЛ-31Ф*

Fig. 4. *General view of GDL on a mixture of "kerosene + air" with the selection of components from two engines of the AL-31F type*

других лазеров, что позволяет получать высокую мощность излучения. Причем применение HF-НХЛ возможно только для космических условий, поскольку его длина волны сильно поглощается в атмосфере, а DF-НХЛ, с длиной волны попадающей в окно прозрачности атмосферы, может использоваться в наземных условиях.

Принципиальная схема лазерной установки на основе HF(DF)-НХЛ показана на рис. 5. Автономный HF(DF)-НХЛ состоит из следующих основных частей: генератора активной среды (ГАС), оптического резонатора, сверхзвукового диффузора, теплообменника для снижения температуры отработанных лазерных газов, эжектора, устанавливаемого в том случае, когда появляется необходимость обеспечения выхлопа в атмосферу.

HF-НХЛ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Одним из перспективных вариантов применения HF-НХЛ является возможность очистки околоземного космического пространства от фрагментов космического мусора (ФКМ) с помощью многоцелевой космической лазерной установки (МКЛУ) [8]. Кроме того, МКЛУ может использоваться как

acteristics have significantly improved, affecting the output parameters of the GDL, such as the pressure behind the compressor and the operating temperature in the combustion chamber. There is a steady increase in the degree of pressure increase to values of 30–35 atm. and the temperature level of workability of materials up to 1200–1250K, as well as an increase in the operating temperature of the gas up to 2000K. All this makes it possible to provide acceptable energy characteristics of the laser and create a CO_2-GDL placed on board an aircraft.

Figure 3 shows the output energy characteristics of the GDL based on the "kerosene-air" fuel composition based on two aircraft engines AL-31F [7]. It can be seen that when using two engines with a high degree of pressure increase and a high flow rate, even when only 5% of the air is taken off, it is possible to obtain the laser power in the uncooled version of the nozzle unit (the temperature in the laser prechamber is not more than 1500K) of about 80 kW. Using cooled nozzle blades and a pre-chamber temperature of about 2000K, the power can be increased to 135 kW. The general view of such a laser is shown in Fig. 4.

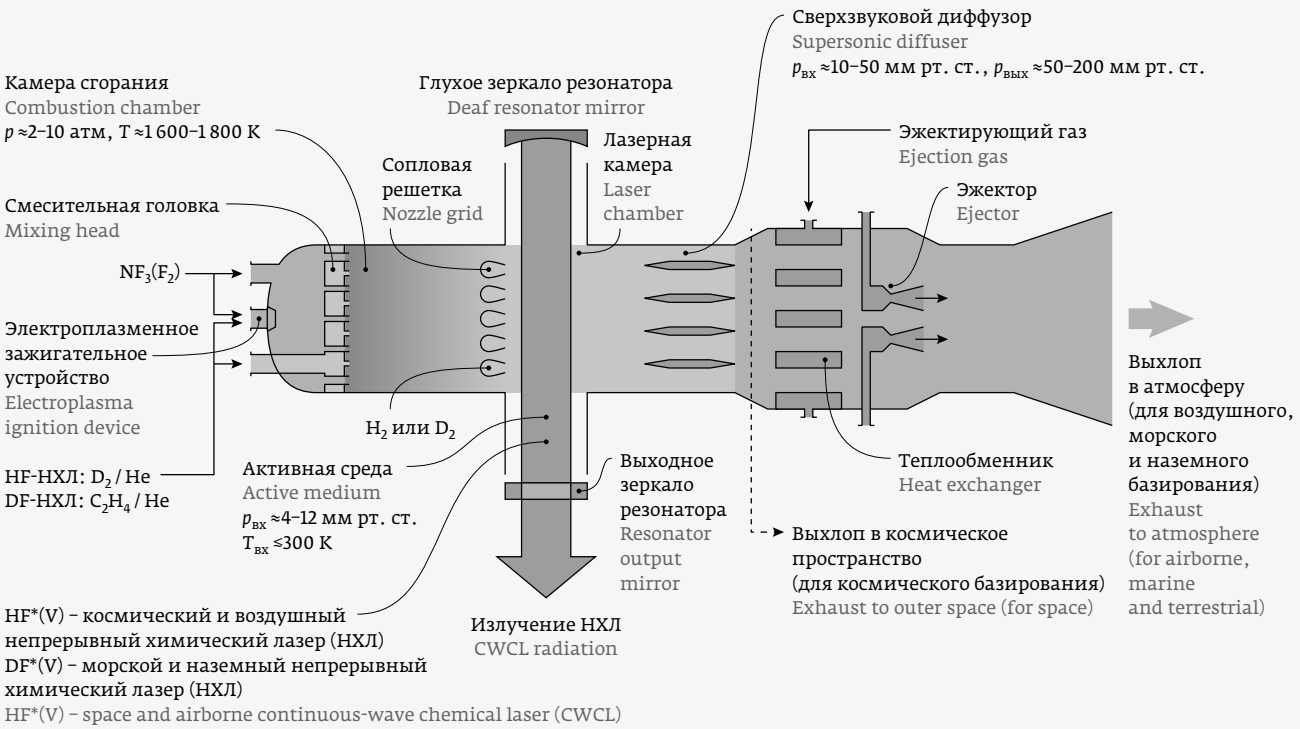


Рис. 5. *Принципиальная схема HF(DF)-НХЛ различных видов базирования*
Fig. 5. *Schematic diagram of HF(DF)-CWCL of various types of basing*

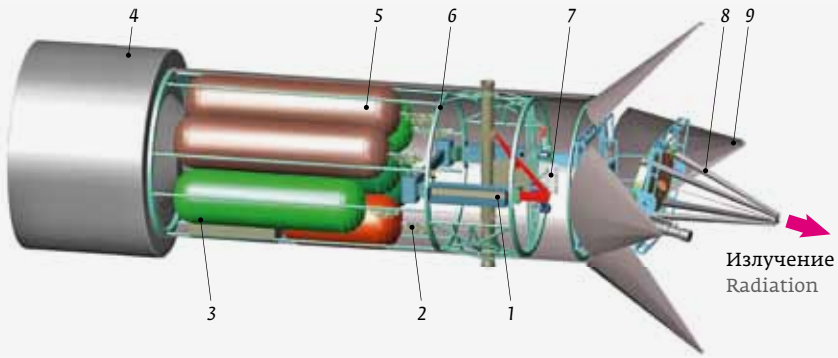


Рис. 6. *Компоновочная схема многоцелевой космической лазерной установки (МКЛУ) на борту космического аппарата (КА) с использованием крупноразмерных плоскоблочных ГАС: 1 – один из модулей крупноразмерного плоскоблочного оконечного усилителя; 2 – система подачи газообразных компонентов лазерного топлива; 3 – отсек криогенных холодильных машин; 4 – функционально-служебный модуль ракеты-носителя «Протон-М»; 5 – баки компонентов лазерного топлива; 6 – силовая рама газодинамического тракта системы генерации силового излучения; 7 – плоскоблочный задающий генератор с предусилителем; 8 – телескоп ФОС; 9 – элемент головного защитного кожуха телескопа ФОС*

Fig. 6. *Layout diagram of a multipurpose space laser facility (MSLF) on board a spacecraft using large-size flat-block AMGs: 1 – one of the modules of a large-size flat-block power amplifier; 2 – system for supplying gaseous components of laser fuel; 3 – compartment for cryogenic refrigerating machines; 4 – functional and service module of the Proton-M launch vehicle; 5 – tanks of laser fuel components; 6 – power frame of the gas-dynamic path of the power radiation generation system; 7 – flat-block master oscillator with a preamplifier; 8 – FOS telescope; 9 – element of the head protective cover of the FOS telescope*

источник зондирующего излучения для анализа содержания углеводородов в атмосфере.

МКЛУ размещается в негерметичном отсеке космического аппарата (КА) и включает в себя: систему генерации излучения, состоящую из генераторов активной среды и оптической системы; систему хранения и подачи компонентов лазерного топлива; формирующую оптическую систему (ФОС) и систему лазерной локации.

Компоновочная схема МКЛУ на борту КА с использованием крупноразмерных плоскоблочных ГАС, прототипы которых разработаны в ОАО НПО Энергомаш, показана на рис. 6. На генераторе активной среды с плоской сопловой решеткой ГАС1 собран задающий генератор импульсно-периодического излучения с последовательно включенным предварительным усилителем мощности излучения. Нейтрализация реактивной тяги при работе ГАС1 обеспечивается выхлопным трактом, содержащим сверхзвуковой диффузор и два симметричных противоположно

CONTINUOUS-WAVE CHEMICAL LASERS BASED ON HF AND DF MOLECULES

Interest in HF(DF)-CWCL is associated with the possibility of efficient conversion of the internal chemical energy of substances into coherent radiation, bypassing other stages of conversion. The chemical efficiency of CWCL significantly exceeds the efficiency of other lasers, which makes it possible to obtain high radiation power. Moreover, the use of HF-CWCL is possible only for space conditions, since its wavelength is strongly absorbed in the atmosphere, and DF-CWCL, with the wavelength falling into the atmospheric transparency window, can be used under ground conditions.

The schematic diagram of a laser facility based on HF(DF)-CWCL is shown in Fig. 5. Autonomous HF(DF)-CWCL consists of the following main parts: an active medium generator (AMG); optical resonator; supersonic diffuser; a heat exchanger to reduce the temperature of the laser exhaust gases; an ejector installed when there is a need to provide exhaust to the atmosphere.

HF-CWCL FOR SPACE APPLICATIONS

One of the promising options for using HF-CWCL is the ability to clean near-earth space from space debris (SD) using a multipurpose space laser facility (MSLF) [8]. Moreover, the MSLF can be used as a source of sounding radiation for analyzing the content of hydrocarbons in the atmosphere.

The MSLF is located in the unpressurized compartment of the spacecraft and includes: a radiation generation system consisting of generators of the active medium and an optical system; storage and delivery system for laser fuel components; forming optical system (FOS) and laser ranging system.

The layout diagram of the MSLF on board the spacecraft using large-size flat-block AMG, the prototypes of which were developed at NPO Energomash, is shown in Fig. 6. On the generator of the active medium with a flat nozzle grating AMG, a master generator of

направленных выхлопных патрубка. Работа ГАС1 может осуществляться как в режиме DF-НХЛ для лазерного зондирования атмосферы Земли, так и в режиме HF-НХЛ с целью борьбы с космическим мусором. Оптическая система СГИ монтируется на отдельной оптической раме.

Система подачи компонентов лазерного топлива в газообразном состоянии в генераторы активной среды СГИ МКЛУ включает в себя цилиндрические баллоны и элементы системы подачи: трубопроводы, клапаны, дроссели, – а также раму и узлы общей сборки. Система обеспечивает работу 10 с в режиме излучения HF-НХЛ и 100 с в режиме DF-НХЛ. Система хранения компонентов лазерного топлива состоит из криогенных цилиндрических баков с эллиптическими днищами для хранения водорода, дейтерия, гелия и трифторида азота.

ФОС состоит из цилиндрического согласующего телескопа с сечением (200×200) мм. Формирующий телескоп содержит зеркала с асферической поверхностью и два оптических шарнира, обеспечивающих наведение излучения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в угловом диапазоне ±7,5° и привод перемещения зеркала контррефлектора. Система лазерной локации включает в себя локационный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с удвоением частоты с энергией излучения ~0,5 Дж, телескоп лазерного локатора с диаметром главного зеркала 120 мм и оптическую систему совмещения силового и локационного каналов.

КА с МКЛУ на борту имеет срок активного существования на орбите 180 суток. Общая масса КА с МКЛУ составляет величину ~19700 кг и может быть размещен под обтекателем ракеты-носителя «Протон-М». При этом общая продолжительность работы составляет 30 минут при времени воздействия на ФКМ ~1 с в режиме импульсно-периодического излучения на молекулах HF с энергией в импульсе 0,8 Дж и 180 минут в режиме излучения на молекулах DF с энергией в импульсе ~5 мДж.

ХИМИЧЕСКИЕ КИСЛОРОД-ЙОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Начиная с девяностых годов прошлого века стал активно развиваться еще один НХЛ – химический кислород-йодный лазер (ХКИЛ). Длина волны излучения ХКИЛ (λ=1,315 мкм) приходится на окно прозрачности атмосферы, а также соответствует рабочему диапазону волоконной оптики. Это означает отсутствие ограничений на использование лазеров этого типа в различных атмосферных и внеатмосферных условиях. Короткая длина

repetitively pulsed radiation with a serially connected preliminary radiation power amplifier is assembled. Neutralization of jet thrust during operation of AMG is provided by an exhaust tract containing a supersonic diffuser and two symmetrical oppositely directed exhaust pipes. The operation of AMG can be carried out both in the DF-CWCL mode for laser sensing of the Earth's atmosphere, and in the HF-CWCL mode in order to combat space debris. The optical system of radiation generation system (RGS) is mounted on a separate optical frame.

The system for supplying laser fuel components in a gaseous state to the active medium generators of the MSLF RGS includes cylinders and elements of the supply system: pipelines, valves, throttles, as well as a frame and units of the general assembly. The system provides 10 s operation in the HF-CWCL radiation mode and 100 s in the DF-CWCL mode. The storage system for laser fuel components consists of cryogenic cylindrical tanks with elliptical bottoms for storing hydrogen, deuterium, helium and nitrogen trifluoride.

FOS consists of a cylindrical matching telescope with a section (200 × 200) mm. The forming telescope contains mirrors with an aspherical surface and two optical hinges, providing guidance of radiation in two mutually perpendicular planes in an angular range of ±7.5° and a drive for moving the counter-reflector mirror. The laser ranging system includes a frequency-doubling yttrium-aluminum garnet laser with a radiation energy of ~ 0.5 J, a laser locator telescope with a main mirror diameter of 120 mm and an optical system for combining the power and location channels.

The spacecraft with MSLF on board has an active lifetime in orbit of 180 days. The total mass of the spacecraft with MSLF is ~ 19,700 kg and it can be placed under the fairing of the Proton-M launch vehicle. In this case, the total duration of operation is 30 minutes with the exposure time to the space debris ~ 1 s in the mode of repetitively pulsed radiation on HF molecules with an energy of 0.8 J per pulse and 180 minutes in the mode of radiation on DF molecules with an energy in the pulse of ~ 5 mJ.

CHEMICAL OXYGEN-IODINE LASERS

Since the nineties of the last century, another CWCL began to actively develop, the chemical oxygen-iodine laser (COIL). The COIL radiation wavelength (λ=1.315 μm) falls within the atmospheric transparency window and also corresponds to the operating range of fiber optics. This means that there are no restrictions on the use of lasers of this type in vari-

волны обеспечивает уменьшение дифракционного предела, а малая плотность активной среды в резонаторной полости – высокое оптическое качество лазерного луча.

Именно на базе кислород-йодного лазера был создан самый мощный на сегодняшний день мобильный комплекс ABL (Airborne Laser, США) [9] мегаваттного класса, размещенный на борту самолета Boeing 747–400F и предназначенный для уничтожения баллистических ракет на дистанциях до 400 км.

Принцип работы химического кислород-йодного лазера основан на преобразовании химической энергии в энергию излучения при смешении потоков синглетного кислорода – $O_2(^1\Delta)$ (СК) и газообразного молекулярного йода. Принципиальная схема химического кислород-йодного лазера представлена на рис. 7.

Сверхзвуковой ХКИЛ состоит из следующих основных элементов: генератора синглетного кислорода (ГСК), в котором происходит наработка синглетного кислорода в ходе газожидкостной реакции газообразного хлора (Cl_2) с щелочным раствором перекиси водорода (ЩРПВ), йодного испарителя, соплового блока (СБ), в котором происходит разгон и смешение потоков СК и газообразного йода, лазерной камеры (ЛК), где струи окислителя СК и газообразного йода смешиваются и реагируют, в результате чего образуются возбужденные атомы I^*, оптического резонатора и системы восстановления давления (СВД), которая обеспечивает выхлоп отработанных продуктов в атмосферу.

ous atmospheric and extra-atmospheric conditions. A short wavelength ensures a decrease in the diffraction limit, and a low density of the active medium in the resonator cavity provides a high optical quality of the laser beam.

It was on the basis of the oxygen-iodine laser that the most powerful mobile complex ABL (Airborne Laser, USA) [9] of the megawatt class, located on board the Boeing 747–400F aircraft, and designed to destroy ballistic missiles at distances up to 400 km, was created.

The principle of operation of a chemical oxygen-iodine laser is based on the conversion of chemical energy into radiation energy by mixing flows of singlet oxygen – O_2 ($^1\Delta$) (SO) and gaseous molecular iodine. A schematic diagram of a chemical oxygen-iodine laser is shown in Fig. 7.

A supersonic COIL consists of the following main elements: a singlet oxygen generator (SOG), in which singlet oxygen is produced during the gas-liquid reaction of gaseous chlorine (Cl2) with an basic hydrogen peroxide (BHP), an iodine evaporator, a nozzle bank (NB), where streams of SO and gaseous iodine are accelerated and mixed of the, the laser chamber (LC), where the jets of the SO oxidizer and gaseous iodine mix and react, resulting in the formation of excited atoms I^*, an optical resonator and a pressure recovery system (PRS), which provides exhaust products into the atmosphere.

In the development of COIL technologies, the main attention was paid to finding ways to increase the efficiency of SOG (increasing the output of SO and utilization of chlorine, reducing the ratio of solution consumption to chlorine consumption, increasing pressure while minimizing SO losses), optimizing the mixing scheme of reacting components in the nozzle block, as well as improving operational characteristics.

One of the most difficult tasks is to ensure the exhaust of the spent active medium of the laser while ensuring optimal conditions for generating radiation. The complexity of the problem is due to the low pressure of the flow in the laser chamber, which leads to high requirements for the compression ratio of the PRS, as well as the presence of chemical and kinetic processes along the entire length of the laser path from the

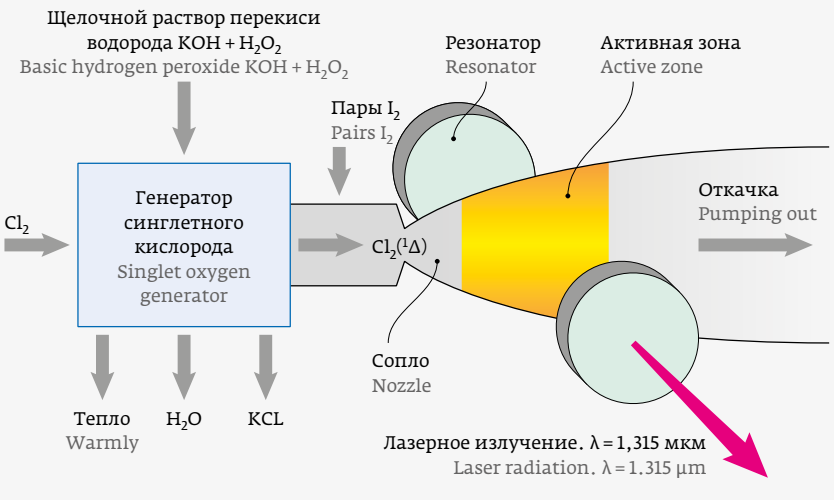


Рис. 7. *Принципиальная схема сверхзвукового химического кислородно-йодного лазера (ХКИЛ)*

Fig. 7. *Schematic diagram of a supersonic chemical oxygen-iodine laser (COIL)*

При развитии технологий ХКИЛ основное внимание уделялось поиску путей повышения эффективности ГСК (увеличению выхода СК и утилизации хлора, снижению отношение расхода раствора к расходу хлора, повышения давления при минимизации потерь СК), оптимизации схемы смешения реагирующих компонентов в сопловом блоке, а также улучшению эксплуатационных характеристик.

Одной из наиболее сложных задач является обеспечение выхлопа отработанной активной среды лазера при обеспечении оптимальных условий генерации излучения. Сложность задачи обусловлена низким давлением потока в лазерной камере, приводящим к высоким требования по степени сжатия СВД, а также наличием химических и кинетических процессов по всей длине тракта лазера от ГСК до выхлопного диффузора, которые приводят к заметному выделению тепла в потоке. Из-за сложности процессов идущих в газодинамическом тракте ХКИЛ проводить модельные экспериментальные исследования в полном объеме не представляется возможным. Поэтому необходимо наличие натурных установок, позволяющих проводить отработку всех элементов ХКИЛ.

На рис. 8 представлен лабораторный ХКИЛ с выходной мощностью до 15 кВт (НПП «Лазерные Системы») и лабораторно-демонстрационный комплекс ХКИЛ разработанный специалистами НПП «Лазерные Системы», учеными БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова и Самарского филиала Физического института РАН [10], включающий

SOG to the exhaust diffuser, which lead to a noticeable release of heat in the flow. Due to the complexity of the processes occurring in the gas-dynamic path of the COIL, it is not possible to carry out model experimental studies in full. Therefore, it is necessary to have full-scale installations that allow the testing of all elements of the COIL.

Fig. 8 shows a laboratory COIL with an output power of up to 15 kW (Laser Systems JSC) and a laboratory demonstration COIL complex developed by specialists of Laser Systems JSC, scientists of the D.F.Ustinov BSTU "VOENMEH" and the Samara branch of the Physics Institute of the Russian Academy of Sciences [10], which includes the latest achievements in the development of COIL and is intended for testing and optimizing the entire process chain from storage of initial components to supplying radiation to the place of use and disposal of the spent active medium.

The laser complex allows to work for up to 30 seconds with a power of more than 300 W with a stable resonator. The centrifugal bubbling singlet oxygen generator provides the ratio of the solution flow rate to the chlorine flow rate up to 1 l/mol, a high chlorine utilization rate (more than 95%) and the singlet oxygen yield (more than 60%). The laser nozzle unit is a single profiled slotted nozzle with an iodine injector in the transonic region. The optical cavity is multimode with an intracavity diaphragm and an output aperture of 50 mm.

The exhaust system of the spent active medium of the laboratory complex is a two-mode system, which

a) b)

Рис. 8. *Химический кислородно-йодный лазер (ХКИЛ): a) – лабораторный 15кВт–ХКИЛ; b) – лабораторно-демонстрационный комплекс ХКИЛ*

Fig. 8. *Chemical oxygen-iodine laser (COIL): a) – laboratory 15 kW – COIL; b) – laboratory demonstration COIL complex*

в себя последние достижения в области разработки ХКИЛ и предназначенный для отработки и оптимизации всей технологической цепи от хранения исходных компонентов до подачи излучения к месту использования и утилизации отработанной активной среды.

Лазерный комплекс позволяет работать до 30 секунд с мощностью более 300 Вт с устойчивым резонатором. Центробежный барботажный генератор синглетного кислорода обеспечивает отношение расхода раствора к расходу хлора до 1 л/моль, высокую степень утилизации хлора (более 95%) и выхода синглетного кислорода (более 60%). Сопловой блок лазера представляет собой одиночное профилированное щелевое сопло с йодным инжектором в трансзвуковой области. Оптический резонатор является многомодовым с внутрирезонаторной диафрагмой и выходной апертурой 50 мм.

Система откачки отработанной активной среды лабораторного комплекса представляет собой двухрежимную систему, включающую двухступенчатый механический насос и криосорбционную систему откачки. Лазер может работать как на механическую систему, так и на криосорбционную. В состав установки входит волоконно-оптическая система, позволяющая транспортировать лазерное излучение на дистанцию до 80 метров.

СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

В СГХЛ в полости резонатора необходимо иметь низкое давление $P \approx 30$торр – для CO_2-ГДЛ, $P = 12–15$ торр для HF/DF-НХЛ и $P = 4–6$ торр для ХКИЛ. Для обеспечения работы СГХЛ в наземных условиях используются системы восстановления давления (СВД), которые в общем случае включают в себя сверхзвуковой выхлопной диффузор (СД) и эжектор (ЭЖ) (рис. 9). CO_2-ГДЛ может функционировать, используя обычные «пассивные» диффузоры. HF/DF-НХЛ требует использования в СВД одноступенчатого эжектора со степенью сжатия 10–12, а для ХКИЛ необ-

includes a two-stage mechanical pump and a cryosorption pumping system. The laser can operate both on a mechanical pump and on a cryosorption system. The installation includes a fiber-optic system that allows transporting laser radiation at a distance of up to 80 meters.

PRESSURE RECOVERY SYSTEMS FOR CONTINUOUS-WAVE CHEMICAL LASERS

In SGCL in the cavity of the resonator, it is necessary to have a low pressure $P \approx 30$ Torr – for CO_2-GDL, $P = 12–15$ Torr for HF/DF-CWCL, and $P = 4–6$ Torr for COIL. To ensure the operation of SGCL in ground conditions, the Pressure Recovery Systems (PRS) are used, which in the general case include a exhaust supersonic diffuser (SD) and an ejector (EJ) (Fig. 9). CO_2-GDL can function using conventional "passive" diffusers. The HF/DF-CWCL requires the use of a single-stage ejector with a compression ratio of 10–12 in the PRS, and a two-stage ejector with a total compression ratio of the order of 50–60 is required for a SGCL [11].

The development of such complex technical systems as PRS for SGCL requires coordination of the gas dynamics of the entire channel, from the laser

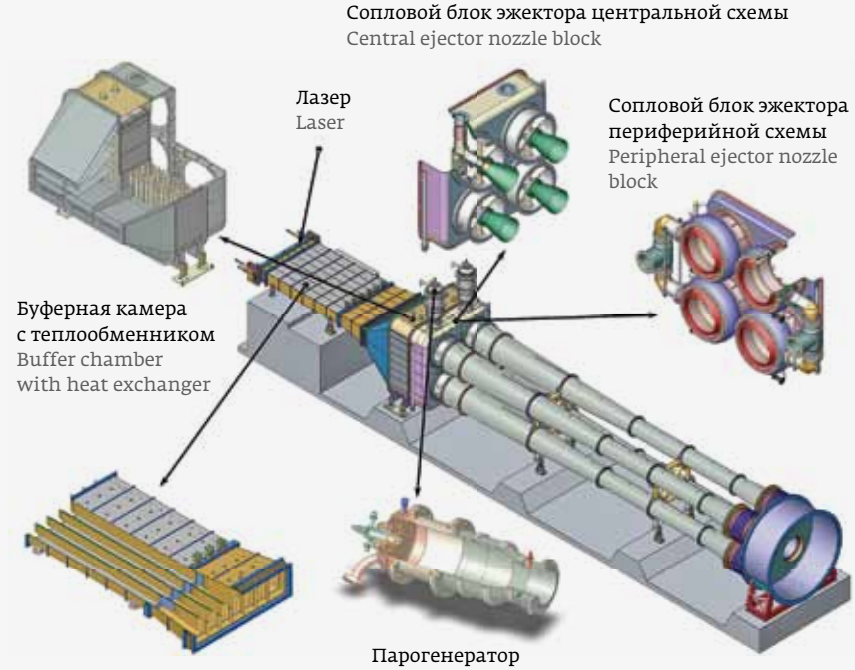


Рис. 9. *Общий вид СВД для DF-НХЛ*
Fig. 9. *General view of PRS for DF-CWCL*

ходим двухступенчатый эжектор с общей степенью сжатия порядка 50–60 [11].

Разработка таких сложных технических систем, как СВД для СГХЛ требует согласования газодинамики всего канала, начиная от соплового блока лазера и заканчивая последней ступенью эжектора. Причем течение в канале осложняется тем, что поток имеет малые числа Re (10^4–10^5 для HF/DF-НХЛ, 10^3–10^4 для ХКИЛ) и сопровождается химическими и кинетическими процессами. Кроме того, канал реальной установки имеет сложную геометрию, что приводит к существенному усложнению течения и появлению особенности запуска такого канала.

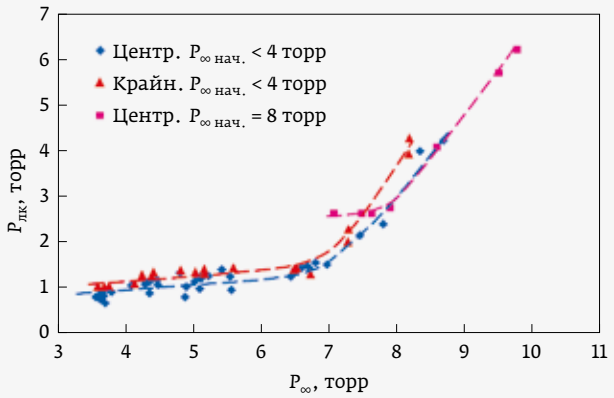


Рис. 10. *Зависимость давления в резонаторе от противодавления при работе ХКИЛ на вакуумную емкость*
Fig. 10. *Dependence of the pressure in the resonator on the back pressure during the operation of the COIL on the vacuum vessel*

ВЫХЛОПНЫЕ СВЕРХЗВУКОВЫЕ ДИФФУЗОРЫ СХЛ

Торможение сверхзвукового потока в каналах СД происходит в системе косых скачков уплотнения, которые возникают из-за нарастания пограничного слоя на стенках канала. Давление восстановления за такой системой скачков при больших числах Re близко к давлению за прямым скачком при соответствующей длине СД [11]. Это становится неверным для химических лазеров, что обусловлено низкими числами Re и тепловыделением в сверхзвуковом потоке.

Интегрально изменение скорости W в потоке при внешнем воздействии описывает известное соотношение

$$\left(M^2-1\right)\frac{dW}{W}=\frac{dF}{F}-dQ-dF_{тр},$$

где dF – изменение площади поперечного сечения канала, dQ – подвод тепла, а $dF_{тр}$ – силы трения. При подводе тепла в сверхзвуковой поток в канале постоянного сечения поток тормозится. Таким образом, в химических лазерах к газодинамиче-

nozzle block to the last stage of the ejector. Moreover, the flow in the channel is complicated by the fact that the flow has low Re numbers (10^4–10^5 for HF/DF-CWCL, 10^3–10^4 for COIL) and is accompanied by chemical and kinetic processes. In addition, the channel of a real installation has a complex geometry, which leads to a significant complication of the flow and the appearance of a launch feature of such a channel.

SCL EXHAUST SUPERSONIC DIFFUSERS

The deceleration of the supersonic flow in the SD channels occurs in a system of oblique shock waves that arise due to the growth of the boundary layer on the channel walls. The recovery pressure behind such a system of jumps at large Re numbers is close to the pressure behind the direct jump at the corresponding length of the SD [11]. This becomes incorrect for chem-

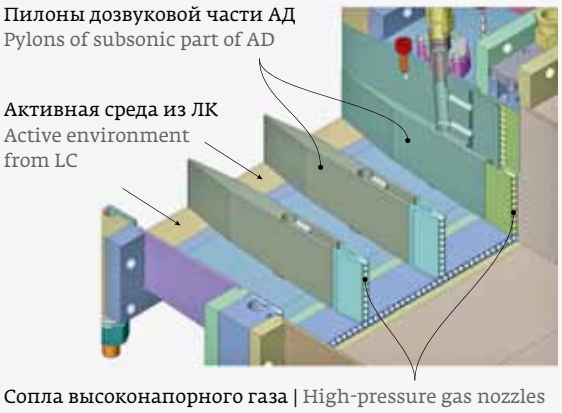


Рис. 11. *Общий вид СВД с активным диффузором для ХКИЛ*
Fig. 11. *General view of PRS with an active diffuser for COIL*

скому механизму торможения потока добавляется механизм, связанный с тепловыделением, что приводит к сокращению длины зоны торможения. При этом ее длина зависит от многих конструктивных и режимных параметров. Поэтому в СХЛ СБ, ЛК и СД должны проектироваться как одно целое. Особенно сильное влияние осложняющих факторов – низкого числа Re потока и тепловыделения на течение наблюдается в ХКИЛ. На рис. 10 приведены экспериментальные данные изменения давления в резонаторе от величины противодавления. Давление в лазерной камере растет при увеличении противодавления, что связано с наличием толстых пограничных слоев, по которым возмущения из дозвуковой зоны передаются навстречу потоку к соплу.

Для достижения эффективной работы СД необходимо контролировать рост пограничного слоя. Для масштабных установок это можно сделать, вдувая в пограничный слой вдоль стенок канала высоконапорный газ из малоразмерных сопел.

В СВД для ХКИЛ эжектор должен иметь две ступени со степенью сжатия $\varepsilon \approx 40–50$. Поэтому можно совместить продувку в диффузоре с первой ступенью эжектора, т. е. реализовать активный диффузор (АД) [12]. На рис. 11 представлена схема входной части активного диффузора и общий вид СВД с АД, разработанный в НПП «Лазерные Системы» для ХКИЛ с расходом активной среды 0,2 кг/сек.

Как показали эксперименты [12], активный диффузор позволяет не только существенно повысить суммарный коэффициент эжекции СВД, но и улучшить оптическое качество излучения ХКИЛ за счет отсоса пограничного слоя со стенок лазерной камеры, что препятствует возникновению в зоне резонатора скачков уплотнения.

ЭЖЕКТОРЫ

Эжектор (ЭЖ) – это устройство, где энергия высоконапорного активного потока в процессе смешения передается низконапорному пассивному газу, за счет чего повышается его полное давление. Классическая схема ЭЖ бывает двух типов: центральная с одним осесимметричным соплом активного газа, либо периферийная, с кольцевым соплом. Задача повышения коэффициента эжекции (отношения расходов пассивного и активного газов) при заданной степени сжатия является важной с точки зрения снижения массо-габаритных характеристик СВД.

В СВД СХЛ активный и пассивный газы разные, в этом случае коэффициент эжекции может быть определен как $n = n_{00}\sqrt{\left(T_{act}/T_{pas}\right)\cdot\left(\mu_{pas}/\mu_{act}\right)}$ (где T – тем-

ical lasers due to the low Re numbers and heat release in the supersonic flow.

Integrally, the change in the velocity W in the flow under external action describes the well-known relationship:

$$\left(M^2-1\right)\frac{dW}{W} = \frac{dF}{F} - dQ - dF_{fr},$$

where dF is the change in the channel cross-sectional area, dQ is the heat input, and dF_{fr} is the friction force. When heat is supplied to a supersonic flow in a channel of constant cross section, the flow is inhibited. Thus, in chemical lasers, a mechanism related to heat release is added to the gas-dynamic mechanism of flow deceleration, which leads to a reduction in the length of the deceleration zone. Moreover, its length depends on many design and operating parameters. Therefore, NB, LC and SD in a SCL should be designed as a whole. A particularly strong influence of complicating factors – low Re number of the flow and heat release on the flow is observed in COIL. Figure 10 shows the experimental data on the change in pressure in the resonator versus the back pressure. The pressure in the laser chamber increases with increasing back pressure, which is associated with the presence of thick boundary layers, along which disturbances from the subsonic zone are transmitted towards the flow to the nozzle.

To achieve effective SD operation, it is necessary to control the growth of the boundary layer. For large-scale installations, this can be done by blowing high-pressure gas from small nozzles into the boundary layer along the channel walls.

In PRS for COIL, the ejector must have two stages with a compression ratio $\varepsilon \approx 40–50$. Therefore, it is possible to combine the blowing in the diffuser with the first stage of the ejector, i. e. implement an active diffuser (AD) [12]. Fig. 11 shows a diagram of the inlet part of an active diffuser and a general view of an PRS with an AD, developed at Laser Systems JSC for COIL with an active medium flow rate of 0.2 kg/sec.

Experiments have shown [12] that an active diffuser allows not only to significantly increase the total ejection coefficient of the PRS, but also to improve the optical quality of COIL radiation due to the suction of the boundary layer from the walls of the laser chamber, which prevents the appearance of shock waves in the cavity.

EJECTORS

An ejector (EJ) is a device where the energy of a high-pressure active flow is transferred to a low-pressure passive gas during mixing, thereby increasing its

пература, μ – молярная масса, а n_{00} – коэффициент эжекции для одинаковых газов). Отсюда видно, что для повышения суммарного n необходимо увеличивать температуру и уменьшать молярную массу активного газа, либо снижать температуру пассивного газа. Поэтому в качестве активного газа в СВД используется парогазовая смесь, с низкой по сравнению с продуктами сгорания молярной массой и максимально допускаемой температурой. А для снижения температуры пассивного газа используются теплообменники.

Повысить коэффициент эжекции по сравнению с традиционными схемами можно путем интенсификации процесса смешения потоков с помощью вихреобразующих элементов, установленных на сопло активного газа. При использовании таких элементов можно повысить значения $n \times \varepsilon$ на 12–15% [13]. При использовании распределенной схемы смешения – вдува активного газа через множество среднеразмерных сопел – можно повысить коэффициент эжекции в 1,5 раза [14].

СВД для ХКИЛ, построенная на основе АД в качестве первой ступени эжектора, и имеющая вторую ступень с интенсификаторами смешения и многосопловой подачей активного газа, позволяет не только сократить габарит лазерного модуля по сравнению с традиционной компоновкой и снизить потребный расход активного газа, но и улучшить оптическое качество излучения [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на долгую и не всегда успешную историю сверхзвуковых газовых и химических лазеров, они и сегодня остаются непревзойденными по мощности непрерывного излучения с высоким оптическим качеством источниками. Еще одним бесспорным достоинством таких лазеров можно считать их энергетическую самодостаточность, что позволяет использовать их в составе автономных мобильных комплексов.

В течение десятилетий, прошедших с момента появления, интерес к этим источникам менялся, и не всегда в позитивном направлении. Однако работы по изучению и совершенствованию самих лазеров, формированию высококачественного излучения, разработки перспективных систем хранения и подготовки рабочего тела, систем восстановления давления продолжаются. что нам и хотелось показать в настоящей статье.

Авторы надеются, что все рассмотренные выше лазеры, и мультикиловаттные CO_2-ГДЛ на базе ГТРД с практически неограниченным временем непрерывного излучения, достаточного для реше-

total pressure. The classical EJ scheme is of two types – central, with one axisymmetric active gas nozzle, or peripheral, with an annular nozzle. The problem of increasing the ejection coefficient (the ratio of passive and active gas flow rates) at a given compression ratio is important from the point of view of reducing the mass-dimensional characteristics of the PRS.

In SCL PRS, the active and passive gases are different, in this case, the ejection coefficient can be defined as $n = n_{00}\sqrt{\left(T_{act}/T_{pas}\right)\cdot\left(\mu_{pas}/\mu_{act}\right)}$ (where T is the temperature, μ is the molar mass, and n_{00} is the ejection coefficient for the same gases). Hence, it can be seen that to increase the total n, it is necessary to increase the temperature and decrease the molar mass of the active gas, or decrease the temperature of the passive gas. Therefore, as an active gas in the PRS, a vapor-gas mixture is used, with a low molar mass in comparison with the combustion products and the maximum allowable temperature. Heat exchangers are used to reduce the temperature of the passive gas.

It is possible to increase the ejection coefficient in comparison with traditional schemes by intensifying the process of mixing flows with the help of vortex-forming elements installed on the active gas nozzle. When using such elements, it is possible to increase the $n \times \varepsilon$ values by 12–15% [13]. When using a distributed mixing scheme – the injection of an active gas through a multitude of medium-sized nozzles, the ejection coefficient can be increased by 1.5 times [14].

PRS for COIL, built on the basis of AD as the first stage of the ejector and the second stage, using mixing intensifiers and multi-nozzle active gas supply, allows not only to reduce the size of the laser module in comparison with the traditional layout and to reduce the required active gas consumption, but also to improve the optical quality of radiation [14].

CONCLUSION

Despite the long and not always successful history of supersonic gas and chemical lasers, they still remain unsurpassed in the power of continuous radiation with high optical quality. Another indisputable advantage of such lasers is their energy “self-sufficiency”, which allows them to be used as part of autonomous mobile complexes.

During the decades that have passed since their inception, interest in them has changed, and not always in a positive direction, however, work on the study and improvement of the lasers themselves, the formation of high-quality radiation, the development of promising storage systems and preparation of the

ния многих практических задач на земле и в воздухе, и высокоэффективные мультимегаваттные непрерывные химические лазеры, способные решать уникальные задачи в дальнем космосе, еще привлекут к себе уже в недалеком будущем внимание возможных пользователей и заказчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазеры: применения и приложения* / Под. ред. **Борейшо А. С.** –СПб.: Лань. 2016. – 520 с.
2. **Robert W. Duffner.** Airborn laser: Bullets of light. Plenum press. – New York: 1997.
3. Patent US 5384802. Laser apparatus / Lockheed Corporation. 1995.
4. Patent US 4713823. Pre-combustion integrated RAM airbreathing laser. 1987.
5. Патент RU 2587509. *Способ работы авиационного газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления, патент на изобретение* / **Вовк М. Ю., Марчуков Е. Ю., Петриенко В. Г., Перельштейн Б. Х.** 2015.
6. **Губарев В.** Самая выгодная энергетика в России будет на газе. *В мире науки*. 2017; 11: 110–115.
7. **Boreisho A. S. et al.** Combustion-driven gas-dynamic CO_2-laser on the basis of modern aviation engines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1565.
8. **Авдеев А. В., Башкин А. С. и др.** Анализ возможности очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора с помощью космической лазерной установки на основе автономного непрерывного химического HF-лазера. *Квантовая электроника*. 2011; 41 (7): 669–674. DOI:10.1070/QE2011v041n07ABEH014534.
9. **Trusdell K. A.** Recent Airborne Laser – laser results. *Proc. SPIE*. 2006; 6343: 6346 1L-1-6346 1L-16.
10. **Борейшо А. С. Киселев И. А. и др.** Лабораторный стенд-демонстратор технологий химического кислородо-йодного лазера. *Фотоника*. 2015; № 4:92–101.
11. **Борейшо А. С., Мальков В. М. и др.** Системы восстановления давления мощных газовых и химических лазеров. *Теплофизика и аэромеханика*. 2001; 8(4): 605–623.
12. **Борейшо А. С. и др.** Химический кислород-йодный лазер: аэрооптика и газодинамика. Инженерно-физический журнал. 2011; 84(1): 57–73.
13. **Борейшо А. С., Дружинин С. Л., Мальков В. М. и др.** Система восстановления давления HF / DF лазера большой мощности: опыт реализации». *Теплофизика и аэромеханика*. 2007; 14(4): 591–607.
14. **Мальков В. М., Кисилев И. А., Шаталов И. В., Дук А. А., Емельянова А. В.** Эжекторы для систем восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров. *Теплофизика и аэромеханика*. 2017; 24(3): 443–459. DOI: 10.1134/S0869864317030118.

ОБ АВТОРАХ

Авдеев Алексей Валерьевич, к. т. н, «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва.
ORCID: 0000-0003-2643-6622

Борейшо Анатолий Сергеевич, д. т. н, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург.
ORCID: 0000-0002-3245-9321

Киселев Игорь Алексеевич, к. т. н, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург.
ORCID: 0000-0002-8092-1648

Морозов Алексей Владимирович, к. т. н, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург.
ORCID: 0000-0002-0948-7367

Орлов Андрей Евгеньевич, к. т. н, АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург.
ORCID: 0000-0001-9515-8107

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

working fluid, pressure recovery systems continue, which we wanted to show in this article.

The authors hope that all the lasers discussed above, including multi-kilowatt CO_2-GDL based on GTJE with practically unlimited time of continuous radiation, sufficient for solving many practical problems on the ground and in the air, and highly efficient multi-megawatt continuous chemical lasers capable of solving unique problems in deep space, will also attract the attention of potential users and customers in the near future.

REFERENCES

1. *Lazery: primeneniya i prilozheniya* / Ed. **Borejsho A. S.** –SPb.: Lan'. 2016. – 520 p.
2. **Robert W. Duffner.** *Airborn laser: Bullets of light. Plenum press.* – New York: 1997.
3. Patent US 5384802. *Laser apparatus* / Lockheed Corporation. 1995.
4. Patent US 4713823. *Pre-combustion integrated RAM airbreathing laser.* 1987.
5. Patent RU 2587509. *Method of operating aircraft gas turbine engine and device therefor* / **Vovk M. YU., Marchukov E.YU., Petrienko V. G., Perelshtejn B. KH.** 2015.
6. **Gubarev V.** Samaya vygodnaya energetika v Rossii budet na gaze. *V mire nauki*. 2017; 11: 110–115.
7. **Boreisho A. S. et al.** Combustion-driven gas-dynamic CO_2-laser on the basis of modern aviation engines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1565.
8. **Avdeev A. V. et al.** About possibilities of clearing near-Earth space from dangerous debris by a spaceborne laser system with an autonomous cw chemical HF laser *Quantum Electronics* (2011),41(7): 669–674. DOI:10.1070/QE2011v041n07ABEH014534.
9. **Trusdell K. A.** Recent Airborne Laser –laser results. *Proc. SPIE*. 2006; 6343: 6346 1L-1-6346 1L-16.
10. **Boreysho A.S, Evdokimov I. M., Kiselev I. A., M. Konyaev, V. Skorniakov, Zagidullin M. V., Khvatov N. A.** Chemical Oxygen Iodine Laser Technologies Laboratory Complex Demonstrator. *Photonics Russia (Fotonica)*. 2015; № 4:92–101.
11. **Boreysho A. S., Malkov V. M. et al.** Pressure recovery systems for high-power gas and chemical lasers. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2001; 8(4): 605–623.
12. **Borejsho A. S. et al.** Himicheskij kislorod-jodnyj lazer: aerooptika i gazodinamika. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2011; 84(1): 57–73.
13. **Boreysho A. S., Druzhinin S. L., Malkov V. M. et al.** Pressure recovery system for a high-power HF / DF laser: implementation practice. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2007; 14(4): 591–607.
14. **Malkov V. M., Kiselev I. A., Shatalov I. V., Duk A. A., Emelyanova A. V.** Ejectors for pressure recovery systems of supersonic chemical lasers. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017; 24(3): 443–459. DOI: 10.1134/S0869864317030118.

ABOUT AUTHORS

Avdeev A. V., Ph. D, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow
ORCID: 0000-0003-2643-6622

Boreysho A. S., Dr. Sc., Professor, BSTU "VOENMEH" D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0002-3245-9321

Kiselev I. A., Ph. D, BSTU "VOENMEH" D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0002-8092-1648

Morozov A. V., Ph. D, BSTU "VOENMEH" D. F. Ustinov, St. Petersburg.
ORCID: 0000-0002-0948-7367

Orlov A. E., Ph. D, Laser Systems JSC, St.Petersburg.
ORCID: 0000-0001-9515-8107

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest.