

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

К.С. Калугин

kalugin-09@mail.ru

SPIN-код: 7266-5720

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены основные возможности применения жидкого кислорода в различных областях науки и техники. Описаны методы получения кислорода, а также способы его охлаждения до жидкого состояния. Приведена одна из принципиальных схем получения жидкого кислорода, долгое время применявшаяся на испытательной станции комплекса 27 на космодроме Байконур. Рассмотрены состав, достоинства и недостатки, а также особенности функционирования комбинированной системы получения и разделения жидкого кислорода, выполненной по схеме с охлаждением жидкого кислорода в теплообменнике с использованием паров двуокиси азота и углекислого газа в качестве хладагента. Проанализированы графики протекания процесса захолаживания криогенных компонентов, а также возможные методы их интенсификации.

### Ключевые слова

Жидкостный ракетный двигатель, кислород, окислитель, ракетный двигатель, жидкое ракетное топливо, охлаждение, хладагент, криогенный компонент, химическое топливо

Поступила в редакцию 29.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** В XX веке в ракетно-космической технике широкое применение получили криогенные компоненты (КК) топлива, среди которых особое положение занимают жидкие кислород, водород, а в перспективе — метан. Однако при высоких энергомассовых характеристиках топлив на основе криогенных компонентов они имеют один существенный недостаток — низкие температуры получения и хранения, что требует модификации старых и создания новых систем заправки, термостатирования и хранения. Потребность использования КК в различных областях науки и техники также потребовала исследования способов улучшения эксплуатационных свойств компонентов.

**Области применения в смежных областях.** Кислород (англ. oxygen) — газ без цвета и запаха, составляющий 21...23 % воздуха, 46,7 % твердой земной коры, 85,8 % воды [1]. Кислород немного тяжелее воздуха, а также малорастворим в воде. При охлаждении до  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$  (90,19 К) кислород превращается в подвижную жидкость голубого цвета, а при  $-219\text{ }^{\circ}\text{C}$  (54,39 К) замерзает [2]. Кислород обладает высокой эффективностью, в связи с этим широко используется в качестве окислителя топлив жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в паре с керосином, водородом и другими горючими для ЖРД [3].

В соответствии с ГОСТ [4] кислород в жидком состоянии выпускается двух сортов: сорт А с содержанием не менее 99,2 % O<sub>2</sub> и сорт Б с содержанием не менее 98,5% O<sub>2</sub>. При этом вводится ограничение на содержание примесей. Кроме того, кислород используется в различных областях науки и техники [5, 6]:

- в строительстве и машиностроительном производстве:
  - для наплавки и напыления металлов;
  - для кислородно-ацетиленовой газосварки и газорезки металлов;
  - для плазменной высокоточной раскройке металлов;
- в нефте- и газодобыче:
  - для повышения энергии вытеснения (создания эффективного движущегося внутрислоевого очага горения) при закачке в пласт;
- в металлургии и горнодобывающей промышленности:
  - при кислородном дутье, производстве стали конвертерным методом, в доменных печах, извлечении золота из руд, производстве ферросплавов, выплавке цинка, свинца, циркония, никеля и других цветных металлов;
  - прямое восстановление железа;
  - огневая зачистка слэбов в литейном производстве;
  - бурение твердых пород огневым методом;
- в медицине:
  - в кислородных барокамерах заправка кислородных генераторов (кислородных масок, подушек и т. д.) в палатах со специальным микроклиматом;
  - изготовление кислородных коктейлей при выращивании микроорганизмов на парафинах нефти;
- в экологии:
  - очистка питьевой воды озоном;
  - при обезвреживании химически активных отходов в очистных установках продувкой сточных вод кислородом;
  - при утилизации мусора в мусоросжигательных печах с кислородным дутьем;
- в химической промышленности:
  - изготовление взрывчатых веществ пропиткой жидким кислородом;
  - производство метилового спирта, аммиака, ацетилена, азотной и серной кислоты, целлюлозы;
  - каталитическая конверсия метана (при производстве синтетического аммиака) и высокотемпературное конверсионное сжигание природного газа;
- в энергетике:
  - для выделения тепла при горении с твердым топливом;
  - обогащение воздуха для бытовых и промышленных котлов, предназначенных для сжигания водно-угольной смеси;
- в военной технике:
  - для работы дизельных двигателей в барокамерах под водой;
  - для работы кислородных масок лётчиков и спасательного оборудования;
- в сельском хозяйстве:
  - для изготовления кислородных коктейлей для прибавки животных в весе;
  - для обогащения кислородом водной среды в рыбоводстве.

**Методы получения жидкого кислорода. Охлаждение.** Существует три основных подхода к получению кислорода [7]:

- 1) химические методы;
- 2) электролиз воды;
- 3) разделение воздуха методом разделения глубокого охлаждения.

После получения газообразного кислорода его необходимо перевести в жидкое состояние путём охлаждения до температуры порядка 58 К. Под термином «охлаждение» подразумевают искусственный отвод теплоты от какого-либо тела с более высокой температурой, чем температура окружающей среды. Такой искусственный отвод теплоты, в сущности, является процессом, включающим перевод теплоты с одного температурного уровня на другой, более высокий, и это определяет основные элементы любого холодильного цикла.

Состояние вещества при низкой температуре характеризуется не только слабым тепловым движением, но и низким значением энтропии.

Низкие температуры практически можно получить различными способами:

- 1) с помощью фазовых превращений тела, сопровождающихся поглощением тепла, например испарение воды, аммиака, фреона или другого подобного хладагента, плавление льда или растворение соли;
- 2) расширением газа или пара, сопровождающимся совершением им внешней работы;
- 3) дросселированием газа или пара;
- 4) десорбцией газа;
- 5) адиабатным размагничиванием некоторых солей;
- 6) пропусканием тока через спай двух металлов (эффект Пельтье).

Первым, вторым и шестыми способами обычно пользуются для получения температур «умеренного холода» (примерно до 170 К). Вторым и третьим способами являются основными, применяемыми для получения температур «глубокого холода» ( $170 \pm 0,5$  К) (иногда пользуются четвертым способом). Наконец, пятый способ служил пока единственной основой для получения сверхнизких температур (ниже 0,5 К).

**Система охлаждения жидкого кислорода до температуры 58 К.** Штатная работа блока объединенной двигательной установки предусматривает использование жидкого кислорода с температурой  $65 \pm 5$  К, поэтому требуется охлаждение кислорода в промышленных масштабах для отработки двигателей и системы объединенной двигательной установки (ОДУ) и заправки изделий на технических позициях.

Потери холода неизбежны (теплопритоки в конструкциях, технология производства работ и т. д.), поэтому необходимо надежно охлаждать кислород до более низкой температуры  $-57...58$  К. Одновременно требуется обеспечить очистку кислорода от примесей  $N_2O$  и  $CO_2$ , поскольку при указанных температурах эти примеси находятся в твердом состоянии и засоряют внутрибаковые заборные устройства [8].

Охлаждать жидкий кислород можно одним из двух способов — отбором теплоты на его кипение при откачке паров или теплопередачей в теплообменнике при откачке паров хладагента.

В лабораторных условиях кислород охлаждают до температуры 58 К, для чего используют способ откачивания его паров до разрежения 10 Па. Но чтобы реализовать этот способ в промышленных масштабах, требовалось бы в сжатые сроки разработать, изготовить и отладить мощные и безопасные при работе с парами кислорода вакуумные насосы.

Охладить кислород в теплообменнике, используя в качестве хладагента жидкий азот, можно лишь до температуры 63 К — температуры замерзания азота. Поэтому на техническом комплексе для охлаждения кислорода создали систему, включающую криогенный теплообменник с хладагентом — гелием, который охлаждался жидким водородом. Однако эта система не отвечала требованиям безопасности работ и поэтому была неприемлема для отработки двигателей и систем ОДУ, проводимой на стендовой базе ракетно-космической корпорации (РКК) «Энергия».

Государственный институт азотной промышленности (ГИАП) [9] и Уральский вагоностроительный завод рекомендовали охлаждать жидкий кислород до температуры 57 К в теплообменнике путем откачки паров хладагента — смеси жидких кислорода и азота. Предложенный хладагент обладал важными достоинствами. Во-первых, минимальной (в зависимости от состава) температурой замерзания 50 К. Во-вторых, охлаждение его до температуры 57 К достигается откачкой паров до разрежения равного 2,4 кПа. И наконец, объемная концентрация кислорода в откачиваемых парах не превышает 10 %.

Два последних свойства этого хладагента позволяли применять в работе серийные вакуумные насосы типа вакуумного водокольцевого насоса (ВВН) и насоса вакуумного золотникового (НВЗ) [10]. Кроме того, компоненты, входящие в данный хладагент, дешевле жидкого водорода. Как показали расчеты, стоимость испаряемого хладагента при охлаждении каждой тонны кислорода на 653 руб. ниже стоимости испаряемого жидкого водорода (в масштабе цен 1984 г.).

В 1983 г. по техническому заданию комплекса 27 РКК «Энергия» Уральский вагоностроительный завод изготовил систему охлаждения жидкого кислорода в теплообменнике с использованием предложенного хладагента (рис. 1) и поставил ее на испытательную станцию комплекса 27 на космодроме Байконур. Эта система включает в себя:

- агрегат-теплообменник, состоящий из внутреннего сосуда для охлаждаемого кислорода и наружного сосуда с хладагентом, смонтированных в теплоизолирующем кожухе на железнодорожной платформе;
- адсорбционный фильтр для очистки заправляемого в агрегат-теплообменник кислорода от примесей;
- агрегат-подпитчик, предназначенный для приготовления и термостатирования хладагента перед заправкой и дозаправкой наружной полости агрегата-теплообменника и представляющий собой теплоизолированную емкость, смонтированную на железнодорожной платформе;

- систему откачки паров хладагента, состоящую из одного насоса ВВН2-50 с максимальным разрежением 20 кПа и трех НВЗ-500 с рабочим диапазоном разрежения 20 кПа ... 10 Па;
- систему криогенных трубопроводов заправки агрегатов жидкими кислородом и азотом и трубопроводы откачки паров хладагента.

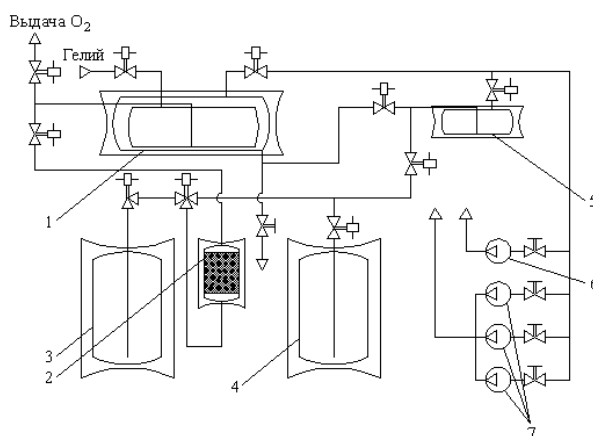


Рис. 1. Принципиальная схема охлаждения жидкого кислорода:

- 1, 2 — стендовые хранилища жидких азота и кислорода; 3 — адсорбированный фильтр;  
4 — агрегат-теплообменник; 5 — агрегат-подпитчик; 6 — ВВН2-50; 7 — НВЗ-500

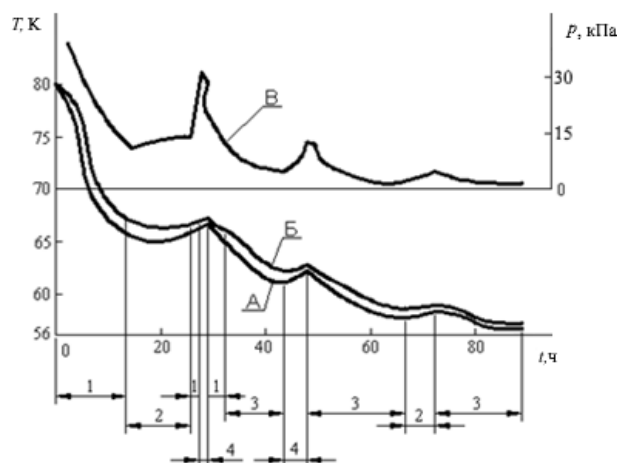
Чтобы обеспечить функционирование системы, на испытательной базе построили помещения для вакуумных насосов и пультовой управления системой, изготовили и смонтировали коммуникации, соединяющие стендовые хранилища жидких кислорода и азота и батареи сжатого гелия с системой охлаждения. С учетом рекомендаций была разработана стендовая технология получения хладагента, заправки и охлаждения кислорода, разработаны и смонтированы системы силового электропитания вакуумных насосов, управления агрегатами пневмогидравлической схемы и измерений параметров.

Пусконаладочные работы проводились в сотрудничестве с ГИАП. В агрегате-подпитчике был получен хладагент — смесь жидких кислорода и азота, который затем заправили во внешний сосуд агрегата-теплообменника. Во внутренний сосуд был заправлен очищенный жидкий кислород, который 20–23 апреля 1983 г. был охлажден до 57,5 К. Это экспериментально подтвердило работоспособность оборудования и правильность принятого способа охлаждения кислорода — адсорбционного фильтра, надежно очищающего кислород от примесей N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> при расходах, не превышающих 3,5 т/ч. Были осуществлены составление хладагента, его охлаждение и дозаправка, измерен состав откачиваемых паров и его изменение при понижении температуры.

Типовой процесс охлаждения кислорода показан на рис. 2. Кривая А представляет изменение усредненной по показаниям двух датчиков температуры хладагента, начиная от времени откачки, кривая Б — изменение усредненной

температуры охлаждаемого кислорода во внутреннем сосуде, погруженном в хладагент. Кривая В показывает изменение остаточного давления в полости хладагента в процессе откачки. Как следует из графиков, хладагент охлаждается до температуры 57 К при остаточном давлении, равном 2,4 кПа, при этом температура кислорода составляет 57,5 К. Продолжительность охлаждения (без учета 14 ч. перерыва откачки) составляет 74 ч; общий цикл, исключая очистку и заправку кислорода в агрегат (13 ч), — 87 ч.

На рис. 2 обозначены технологические операции, осуществляемые в процессе охлаждения кислорода; 1 — откачка паров хладагента вакуумным насосом ВВН2-50; 2 — перерыв в откачке (окончание рабочего дня) 3 — откачка паров хладагента вакуумным насосом НВЗ-500; 4 — дозаправка хладагента, производимая для восполнения потерь при его испарении.



**Рис. 2.** Зависимость температуры кислорода и остаточного давления в полости хладагента от времени охлаждения (экспериментальные точки)

Большой объем испытаний и напряженные сроки отработки агрегатов и системы изделия 11Д11 (опытный РД-502) потребовали поиска путей совершенствования технологического процесса с целью сокращения его продолжительности, повышения безопасности работ и надежности оборудования.

Анализ получаемых результатов работ помог найти оптимальный исходный состав хладагента, позволивший упростить его дозаправку в процессе охлаждения. Двойная дозаправка применявшегося до этого хладагента исходного состава была заменена одноразовой дозаправкой предварительно охлажденным азотом, что дало возможность значительно снизить уровень гидроударов в полости хладагента, происходящих при дозаправках в первых циклах охлаждения. Пневматическая схема была доработана таким образом, чтобы охлаждение азота насосом ВВН2-50 в агрегате-подпитчике проводилось одновременно с откачкой паров хладагента в агрегате-теплообменнике.

Были совмещены заправка кислорода и его охлаждение. Раньше эти операции проводились последовательно. Их совмещение позволило не только сокра-

тить общие затраты времени, но и активировать процесс теплопередачи за счет перемешивания кислорода. Кроме того, была внедрена непрерывная, круглосуточная откачка, так как без этого приходилось компенсировать прогрев хладагента и кислорода двух- или трехчасовой откачкой.

При эксплуатации системы было внесено 28 изменений в пневмогидравлическую схему. Благодаря указанным мероприятиям продолжительность заправки и охлаждения жидкого кислорода была сокращена с 87 до 50 ч. На рис. 3 представлен процесс охлаждения кислорода, проведенный по улучшенной технологии. Кривая Б выражает зависимость усредненной температуры кислорода от времени захолаживания. Указаны основные операции: 1 — заправка кислорода в сосуд агрегата-теплообменника; 2 — откачка паров хладагента насосом ВВН2-50; 3 — откачка паров хладагента насосами НВЗ-500; 4 — подпитка хладагента охлажденным азотом.

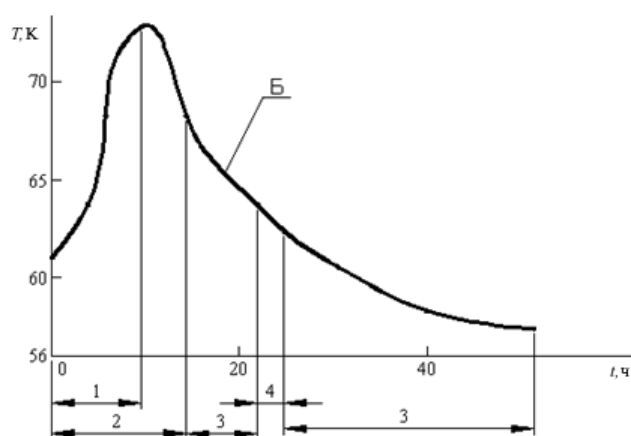


Рис. 3. Зависимость температуры кислорода от времени охлаждения

Эксплуатация системы охлаждения кислорода началась в 1985 г. И продолжалась до 1992 г., за этот период было осуществлено более 140 циклов охлаждения кислорода, не было допущено ни одной задержки испытаний из-за отсутствия охлажденного кислорода (см. таблицу). В дальнейшем система была законсервирована. Ниже представлено количество кислорода, охлажденного до 57...58 К.

**Характеристики эксплуатации системы охлаждения кислорода на комплексе 27**

Год	Количество охлажденного O <sub>2</sub> , т	Количество циклов
1985	240	8
1986	550	17
1987	694	20
1988	1087	41
1989	637	27
1990	630	18
1991	640	16
Всего	4478	147

Аналогичная система охлаждения кислорода для обеспечения испытаний изделия ЭУ597 (стендовый вариант ОДУ 17Д11 для многоразового транспортного корабля), учитывающая опыт Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва, была смонтирована в Приморском филиале предприятия. С ее помощью было захожено 360 т кислорода.

Основные результаты создания и эксплуатации системы охлаждения жидкого кислорода до 57 К на испытательной станции комплекса 27:

– впервые освоено охлаждение жидкого кислорода до температуры 57...58 К в теплообменнике в промышленных масштабах с применением нового хладагента. Было захожено более 4000 т кислорода;

– освоена технология получения и охлаждения до температуры 57 К нового хладагента — смеси жидких кислорода и азота. Этот хладагент, сохраняя жидкое состояние до температуры 50 К, может быть применен с большей эффективностью вместо жидкого азота в качестве вспомогательного хладагента в криогенных линиях электропередач, в микрокриогенных системах, а также в промышленном производстве жидких водорода и гелия;

– обеспечена необходимая стендовая обработка агрегатов и систем изделия 17Д11 со штатной температурой жидкого кислорода.

**Заключение.** В настоящее время на действующих ракетах-носителях (РН) используются следующие компоненты жидких ракетных топлив: керосин (Delta IV, Falcon 9, Союз и др.), метан (верхние ступени Falcon 9 и Falcon Heavy), водород (Ariane-5), гептил (Протон-М) в качестве горючих, а также кислород (Ariane-5, Delta IV, Falcon 9, Союз, верхние ступени Falcon 9 и Falcon Heavy и др.) и азотный тетраоксид (Протон-М) в качестве окислителей. Стоит отметить, что 4 из 6 компонентов являются криогенными, причем кислород используется в качестве окислителя на большинстве действующих РН.

Таким образом, получение жидкого кислорода, его охлаждение и поддержание требуемой температуры при хранении являются одними из основных задач космодрома наряду с подготовкой РН и стартовых комплексов к запуску.

## Литература

- [1] Богатов В.И. История кислорода земной атмосферы. М., Недра, 1985.
- [2] Вассерман А.А., Рабинович В.А. Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов. М., Комитет стандартов, мер и измерит. приборов при Совмине СССР, 1968.
- [3] Штехер М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. М., Машиностроение, 1976.
- [4] ГОСТ 6331-78. Кислород жидкий технический и медицинский. Технические условия. М., Изд-во стандартов, 1998.
- [5] Глизманенко Д.Л. Получение кислорода. М., Химия, 1972.
- [6] Илюшин Ю.С., Олизаров В.В. Кислородное оборудование летательных аппаратов и высотное спецснаряжение. М., Воениздат, 1970.
- [7] Глупанов В.Н., Шумяцкий Ю.И., Серегин Ю.А. и др. Получение кислорода и азота адсорбционным разделением воздуха. *Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация.* М., Цинтихимнефтемаш, 1991.



- [8] Лавренченко Г.К., Швец С.Г. Снижение удельного энергопотребления при производстве жидкого кислорода в ВРУ среднего давления. *Технические газы*, 2009, № 5, с. 26–31.
- [9] ОАО "ГИАП". Об институте. *giap-m.com: веб-сайт*. URL: <https://www.giap-m.com/giap> (дата обращения: 19.03.2019).
- [10] Вакуумные насосы. *intech-group.ru: веб-сайт*. URL: [https://www.intech-group.ru/directions/vacuum/vakuumnye\\_nasosy/](https://www.intech-group.ru/directions/vacuum/vakuumnye_nasosy/) (дата обращения: 19.03.2019).

**Калугин Константин Сергеевич** — студент кафедры «Ракетные двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Бобров Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

## FEATURES OF OBTAINING LIQUID OXYGEN FOR LIQUID FUEL ROCKET ENGINES

K.S. Kalugin

kalugin-09@mail.ru

SPIN-code: 7266-5720

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*The paper is concerned with the main possibilities of using liquid oxygen in various fields of science and technology. In this paper, the author described the methods for producing oxygen and the methods for cooling it to a liquid state. It is given one of the principal schemes for obtaining liquid oxygen, which has been used for a long time at the test station of complex 27 at Baikonur cosmodrome. The author considered the composition, advantages and disadvantages, and the peculiarities of functioning of the combined system for the production and separation of liquid oxygen, performed according to the scheme with cooling of liquid oxygen in a heat exchanger using nitrogen dioxide vapors as a refrigerant. In this paper, it is analyzed the graphs of the process of cooling the cryogenic components and possible methods of their intensification.*

### Keywords

*Liquid fuel rocket engine, oxygen, oxidizer, rocket engine, liquid rocket fuel, cooling, coolant, cryogenic component, chemical fuel*

Received 29.04.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Bgatov V.I. Istoriya kisloroda zemnoy atmosfery [The history of oxygen in Earth atmosphere]. Moscow, Nedra Publ., 1985 (in Russ.).
- [2] Vasserman A.A., Rabinovich V.A. Teplofizicheskie svoystva zhidkogo vozdukha i ego komponentov [Thermal-physical properties of liquid air and its components]. Moscow, Komitet standartov, mer i izmerit. priborov pri Sovmine SSSR Publ., 1968 (in Russ.).
- [3] Shtekher M.S. Topliva i rabochie tela raketnykh dvigateley [Theory and rocket working body]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976 (in Russ.).
- [4] GOST 6331-78. Kislorod zhidkiy tekhnicheskii i meditsinskiy. Tekhnicheskie usloviya [State standard 6331-78. Liquid technical and medical oxygen. Specifications]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1998 (in Russ.).
- [5] Glizmanenko D.L. Poluchenie kisloroda [Oxygen manufacture]. Moscow, Khimiya Publ., 1972 (in Russ.).
- [6] Ilyushin Yu.S., Olizarov V.V. Kislorodnoe oborudovanie letatel'nykh apparatov i vysotnoe spetssnaryazhenie [Aircraft oxygen equipment and high-altitude special equipment]. Moscow, Voenizdat Publ., 1970 (in Russ.).
- [7] Glupanov V.N., Shumyatskiy Yu.I., Seregin Yu.A., et al. Poluchenie kisloroda i azota adsorbtsionnym razdeleniem vozdukha [Oxygen and nitrogen manufacture by adsorptive fractionation of air]. *Promyshlennaya i sanitarnaya ochildka gazov. Obzornaya informatsiya* [Industrial and sanitary gas purification. Review]. Moscow, Tsintikhimneftemash Publ., 1991 (in Russ.).

- [8] Lavrenchenko G.K., Shvets S.G. Decrease of specific energy consumption during manufacture of liquid oxygen in asp of average pressure. *Tekhnicheskie gazy*, 2009, no. 5, pp. 26–31 (in Russ.).
- [9] OAO "GIAP". Ob institute [OAO "GIAP". About institute]. *giap-m.com: website*. URL: <https://www.giap-m.com/giap> (accessed: 19.03.2019) (in Russ.).
- [10] Vakuumnye nasosy [Vacuum pumps]. *intech-group.ru: website*. URL: [https://www.intech-group.ru/directions/vacuum/vakuumnye\\_nasosy/](https://www.intech-group.ru/directions/vacuum/vakuumnye_nasosy/) (accessed: 19.03.2019) (in Russ.).

**Kalugin K.S.** — Student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Bobrov A.N., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.