

**О ВОПРОСАХ ОТБОРА И ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОБ ВОЗДУХА ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Научная статья

**Чулин И.Н.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-8098-2264;

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (inchulin[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Описаны современные методы и принципы отбора и анализа проб воздуха при стендовых испытаниях газотурбинного двигателя, учтён многолетний опыт эксплуатации оборудования первого поколения для отбора и анализа проб воздуха, разработан автоматизированный лабораторный комплекс для отбора и газохроматографического анализа проб воздуха при стендовых испытаниях авиационного газотурбинного двигателя, разработан комплекс для отбора проб воздуха, разработан комплекс для газохроматографического анализа проб воздуха, разработана установка для прокачки поверочной газовой смеси, разработана установка для определения рабочих объёмов вакуумируемой части, разработана установка для подачи газов, применены современные контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации.

**Ключевые слова:** отбор и газохроматографический анализ проб воздуха.

**ON THE ISSUES OF AIR SAMPLING AND GAS CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS DURING BENCH TESTS OF GAS TURBINE ENGINES**

Research article

**Chulin I.N.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-8098-2264;

<sup>1</sup> Research Institute of Technology, Control and Diagnostics of Railway Transport, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (inchulin[at]yandex.ru)

**Abstract**

Modern methods and principles of air sampling and analysis during bench tests of gas turbine engine are described, many years of experience in operating the first-generation equipment for air sampling and analysis are taken into account, an automated laboratory complex for air sampling and gas-chromatographic analysis during bench tests of aviation gas turbine engine is developed, as well as a complex for air sampling and a complex for gas-chromatographic analysis of air samples, an installation for pumping of calibration gas mixture, an installation for determining the working volumes of the evacuated part, and an installation for gas supply. Modern instrumentation and automation means are applied.

**Keywords:** air sampling and gas chromatographic analysis.

**Введение**

В современном мире авиационная промышленность занимает одну из лидирующих позиций по разработке и внедрению инновационных технологий. Повседневная жизнь человека уже не может обойтись без ежедневного использования авиационной техники. Защита интересов страны, грузопассажирские авиаперевозки, использование авиации специальными службами – это ежедневные задачи современной авиации. В нашем стремительно развивающемся мире государства, обладающие наукоемким и технологическим потенциалом для разработки и производства новейших летательных аппаратов, занимают прочные позиции, позволяющие решать в свою пользу политические и экономические вопросы в конкуренции с другими игроками на мировой арене.

Авиация развивается параллельно с другими отраслями промышленности, в том числе, авиадвигателестроением. Современные летательные аппараты оснащаются турбореактивными авиационными двигателями. В свою очередь турбореактивный авиадвигатель надежно обеспечивает безопасный полёт на разных эшелонах полета в различных климатических районах.

Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на безопасность авиаперелетов, является поддержание приемлемых условий жизнеспособности экипажа и пассажиров летательного аппарата. Для обеспечения таких условий осуществляется наддув, вентиляция и обогрев грузопассажирского салона и кабины экипажа, воздухом, отбор которого выполнен из компрессора турбореактивного авиадвигателя. Показатели качества данного воздуха необходимо жестко контролировать.

В современных турбореактивных авиадвигателях применяются опоры из различного вида подшипников, обеспечивающие вращение подвижных частей. Смазка опор выполняется специальным авиационным маслом, которое подается в них маслонасосом. В течение жизненного цикла авиадвигателя, уплотнения, предотвращающие утечки масла из опор и попадания его в другие части авиадвигателя, могут изнашиваться и подвергаться разрушению. При попадании масла на высоконагретые детали авиадвигателя, а также под действием высокого давления, происходит термоокислительная реакция, авиационное масло разлагается на различные летучие и токсичные соединения.

Следовательно, такие вещества могут попасть в воздух, отбираемый из компрессора для системы кондиционирования воздуха (СКВ) летательного аппарата.

Воздух, отбираемый для СКВ, необходимо подвергать анализу на содержание предельно допустимых концентрации (ПДК) вредных летучих и токсичных соединений. Данная процедура строго контролируется государственными и ведомственными стандартами: ГОСТ 12.1.005 [1], АП-23 [2], АП-25 [3], АП-29 [4], СанПиН 2.5.1.051-96 [5] и др.

Из выше сказанного следует, что разработка и производство средств для определения ПДК в воздухе, отбираемом для СКВ, на этапе стендовых испытаний авиадвигателя на предприятии-изготовителе является важнейшей задачей разработчиков и производителей авиационной промышленности.

### Методы и средства отбора и анализа проб воздуха

Используя Методические указания 1.1.258—99 [6] (МУ), сертифицированные Ростестом, а также накопленный опыт эксплуатации оборудования первого поколения [7], конструкторским коллективом, был разработан автоматизированный лабораторный комплекс с применением современных цифровых измерительных приборов [8], позволяющий производить:

- отбор воздуха из компрессора на испытательном стенде для ГТД;
- анализ отобранного воздуха с применением газовых хроматографов.

Лабораторный комплекс (Рис. 1) делится на следующие составные части:

- комплекс для отбора проб воздуха (КОПВ);
- комплекс для газохроматографического анализа проб воздуха (КГАПВ);
- установка для прокачки поверочной газовой смеси;
- установка для определения рабочих объемов вакуумируемой части;
- установка для подачи газов.

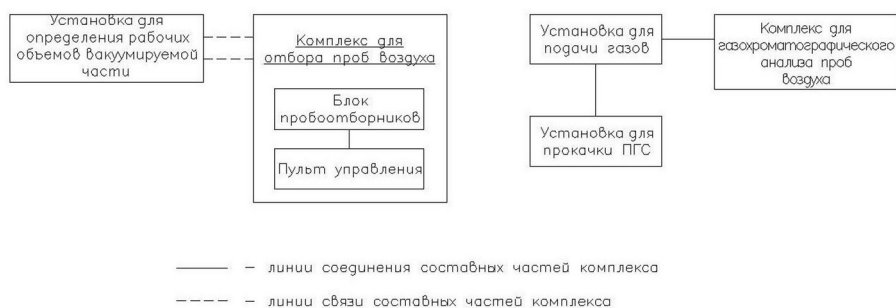


Рисунок 1 - Структурная схема комплекса

КОПВ [9] (Рис. 2) состоит из узла отбора проб, пульта управления и предназначен для отбора воздуха из компрессора ГТД. Узел пробоотборников располагается в непосредственной близости от испытываемого ГТД и представляет из себя металлический каркас в виде соединенных вертикальных панелей. На каркасе установлены: вакуумный насос, воздухозаборник проб в виде гребенки, установленный на входе в ГТД, пять баков с измерительными датчиками давления воздуха и температуры фильтры для осушения воздуха, электромагнитные дистанционно управляемые клапаны, пробоотборники содержащие адсорбционные пакеты с концентраторами, разветвитель потока воздуха с жиклерами. Пульт управления подключается к общему пульта управления всего испытательного стенда. Соединение пульта управления и узла пробоотборников с испытательным стендом осуществляется специальным кабелем.

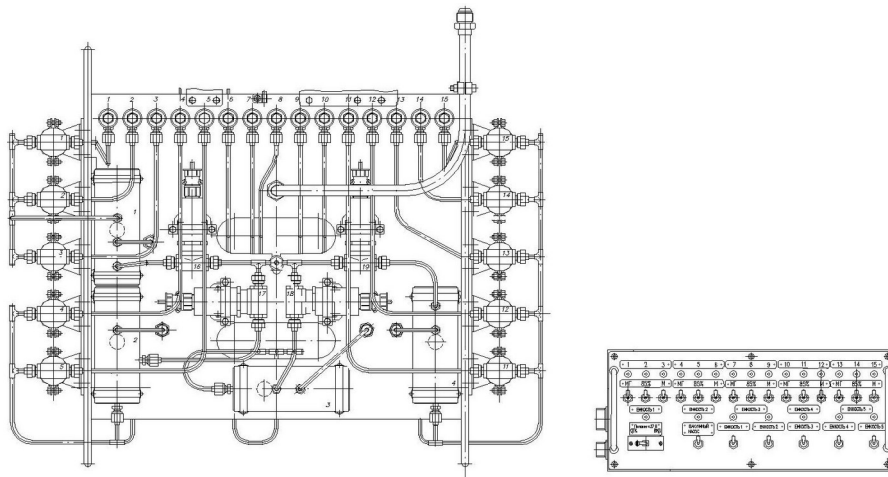


Рисунок 2 - Комплекс для отбора проб воздуха

Методика отбора проб предполагает продувку воздуха объемом от 500 до 1000 см<sup>3</sup>, отобранного из компрессора и на входе в ГТД, через пробоотборники с последующим осаждением вредных примесей в концентраторах. Съемные концентраторы заполнены активными сорбентами для поглощения различных компонентов вредных летучих и токсичных соединений: альдегидов, паров авиационного керосина, паров и аэрозолей авиационного масла, кетонов, трикрезилфосфата, окиси углерода и ароматических углеводородов.

КОПВ обладает расширенными функциональными возможностями по сравнению с использованным ранее, повышенным удобством эксплуатации и дополнительным баком, который позволяет сократить время отбора воздуха, что приводит к экономии дорогостоящего авиационного керосина.

Остальные установки и КГАПВ располагаются в газохроматографической лаборатории в другом помещении.

КГАПВ [10] (Рис. 3) используется для определения вредных летучих и токсичных соединений и их ПДК в пробах воздуха. КГАПВ состоит из:

- прибор для получения деионизированной воды «Водолей»;
- два усилителя электрометра;
- два газовых хроматографа с плазменно-ионизационными детекторами (ПИД);
- хроматографические насадочные колонны, заполненные адсорбентом;
- газовый хроматограф с детектором по теплопроводности (ДТП);
- концентраторы с отобранными пробами воздуха;
- прибор преобразования информации (ПФИ);
- компьютер, имеющий специальное программное обеспечение;
- генератор водорода «ГВЧ-12А»;
- три блока подготовки газа (БПГ) с пультами управления;
- пульт управления подачи водорода (ПУПВ);
- три пульта управления (ПУ-09)
- блок питания детектора хроматографа с ДТП (БПД-104);
- блок питания детектора хроматографа с ПИД (БПД-45-2).

Прибор «Водолей» соединен с генератором «ГВЧ-12А», который в свою очередь связан через ПУПВ с каждым БПГ с ПИД. К БПД-104, соединенному с хроматографом с ДТП, и двум усилителям электрометра, подключенным к двум хроматографам с ПИД, подведены кабель-соединители от ПУ-09 и ПФИ.

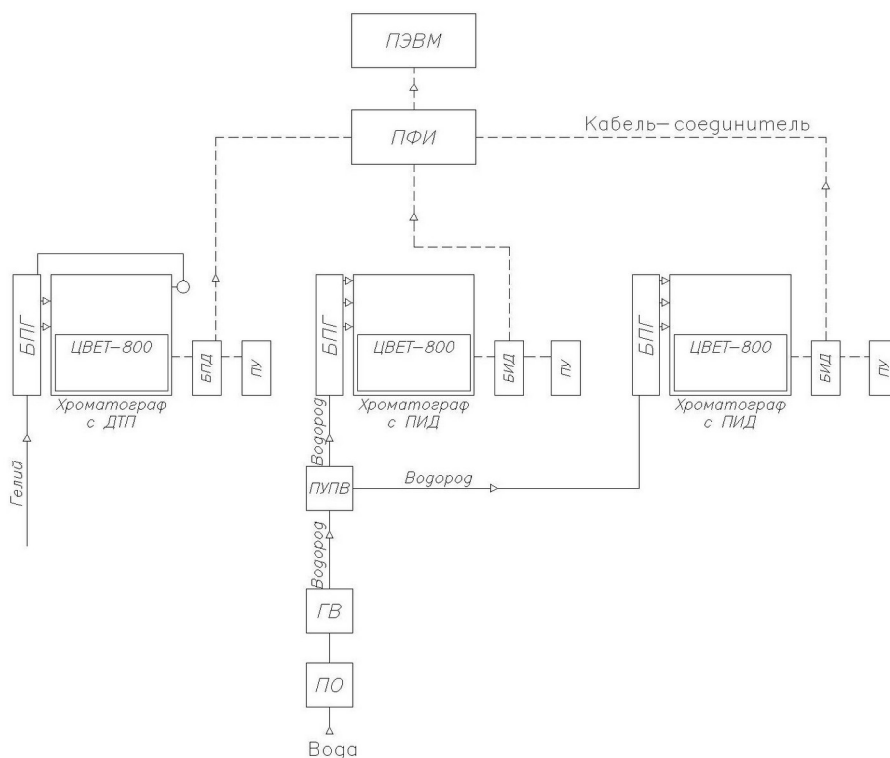


Рисунок 3 - Комплекс для газохроматографического анализа проб воздуха

Установка для прокачки поверочной газовой смеси (ПГС) [11] (Рис. 4) предназначена для градуировки хроматографа с детектором по теплопроводности путём прокачки поверочной газовой смеси через концентраторы, используемые в блоке пробоотборников для отбора проб воздуха на содержание окиси углерода. Установка состоит из прямоугольного каркаса, облицованного вертикальными и горизонтальными стенками, во внутренней полости которого размещены баки, электромагнитные клапаны, вакуумный насос, а на лицевой панели — сигнальные лампы и кнопки управления, снабжена точными датчиками давления, точным датчиком температуры, цифровыми измерителями-регуляторами давления и цифровым измерителем температуры, выведенными на лицевую панель, при этом соединение составных частей установки выполнено в виде гибких трубопроводов и быстроразъемных цанговых фитингов, причем установка снабжена блоком кондиционирования и фильтром влагоотделителем, размещенными на задней вертикальной стенке и обеспечивающим очистку и осушение сжатого воздуха, подводимого для поддува

внутренней полости установки, а также сигнализатором давления для поддержания избыточного давления внутри установки.

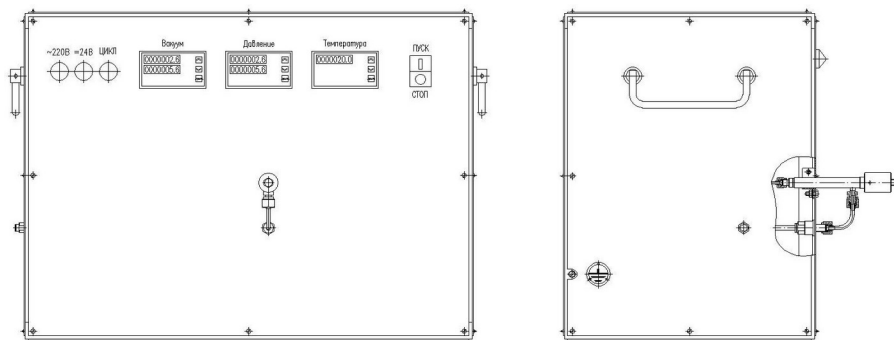


Рисунок 4 - Установка для прокачки ПГС

Установка для определения активных объемов вакуумируемой части [12] (Рис. 5) предназначена для точного определению рабочих объемов вакуумируемой части блока пробоотборников. Установка состоит из прямоугольного каркаса, облицованного вертикальными и горизонтальными стенками, во внутренней полости которого размещены: бак с индикатором заполнения, вакуумметр, точные игольчатые вентили. На левой боковой вертикальной стенке установлены штуцера присоединения трубопроводов от вакуумного насоса и измеряемого (вакуумируемого) изделия. На правой боковой вертикальной стенке установлены штуцер подвода мерной жидкости и штуцер подвода воздуха из атмосферы. Мерная жидкость подводится к установке из стандартного мерного цилиндра, расположенного справа от установки, через трубопровод.

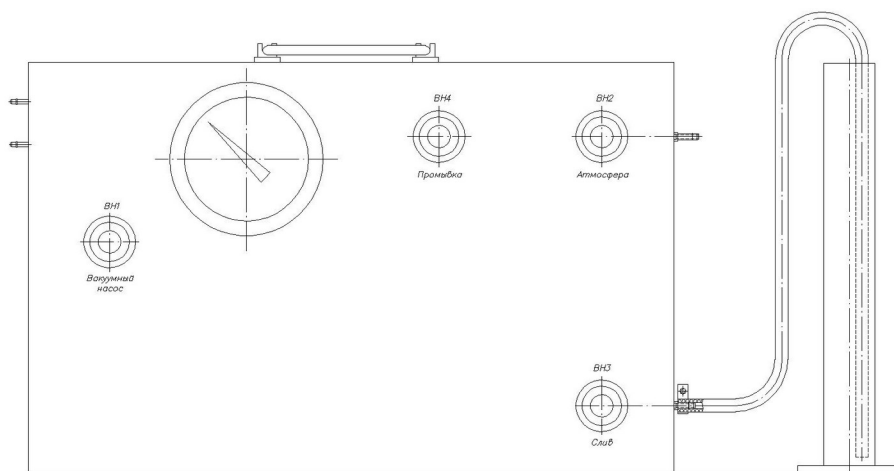


Рисунок 5 - Установка для определения активных объемов вакуумируемой части

Установка для подачи газов [13] (Рис. 6) предназначена для подачи газов: гелий, воздух и поверочной газовой смеси к комплексу для газохроматографического анализа проб воздуха и установке для прокачки поверочной газовой смеси. Установка для подачи газов состоит из каркаса, облицованного вертикальными и горизонтальными стенками, распашными створками, во внутренней полости которого размещены баллоны с газом, крепящиеся к каркасу при помощи хомутов, редуктор газовый баллонный, а также один газовый баллон с редуктором газовым баллонным, расположенным снаружи каркаса и соединяющийся с ним при помощи гибкого шланга и хомутов, одна из облицовочных стенок выполнена в виде наклонной панели управления, на которой размещены редуктор газовый баллонный и точные игольчатые вентили, а верхняя горизонтальная стенка – в виде панели присоединительных штуцеров, соединение составных частей установки выполнено при помощи быстроразъемных цанговых фитингов и гибких соединительных трубок, причем на задней вертикальной стенке выведен присоединительный штуцер фильтра осушения воздуха, позволяющего осуществлять осушение подводимого к установке сжатого.

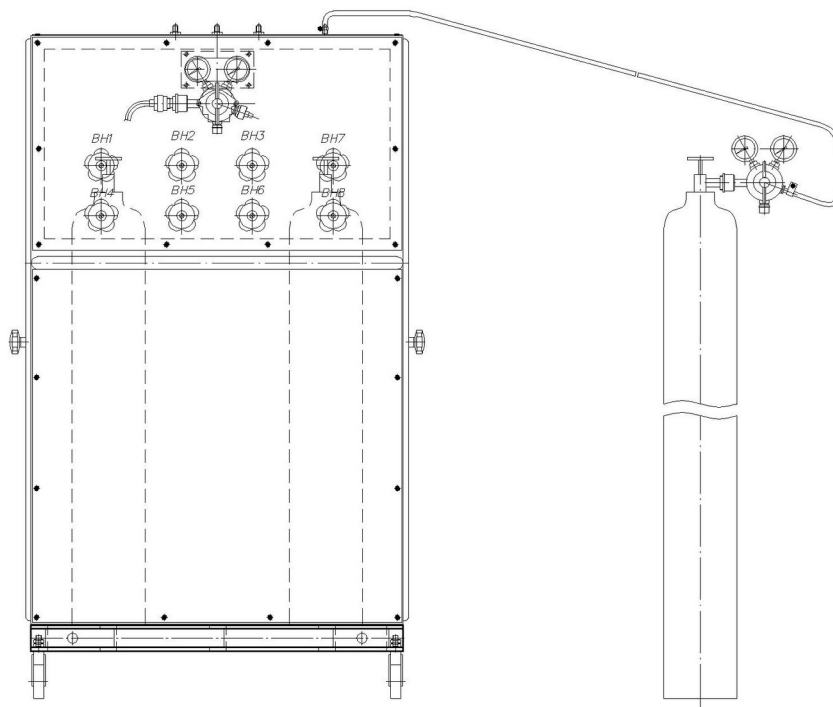


Рисунок 6 - Установка для подачи газов

### Заключение

Создание автоматизированного лабораторного комплекса для отбора и газохроматографического анализа проб воздуха при стендовых испытаниях ГТД с применением современной элементной базы позволило обеспечить:

- сокращение времени отбора проб воздуха из компрессора ГТД;
- экономию авиационного топлива;
- высокую точность измерения (средняя суммарная погрешность не более 5%);
- высокую автоматизацию и производительность процесса отбора и анализа проб;
- оптимизацию процесса контроля и хранения данных, получаемых при анализе проб;
- оперативность сбора и обработки большого объема аналитической информации.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.. — Введ. 1989-01-01. — М.: Институт стандартизации, 1989. — 78 с.
2. Авиационные правила. Часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов. — Введ. 1993-01-01. — М.: АВИАИЗДАТ, 2014. — 207 с.
3. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. — Введ. 1994-01-01. — М.: АВИАИЗДАТ, 2009. — 274 с.
4. Авиационные правила. Часть 29. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. — Введ. 1998-03-27. — М.: АВИАИЗДАТ, 2018. — 180 с.
5. СанПиН 2.5.1.051-96. Гигиена и эпидемиология на транспорте. Условия труда и отдыха для летного состава гражданской авиации. — Введ. 1996-03-19. — М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996. — 14 с.
6. МУ 1.1.258-99 – Двигатели газотурбинные авиационные. Порядок отбора и газохроматографического анализа проб воздуха из компрессора двигателя при стендовых испытаниях. — Введ. 01.07.2000, НИИСУ.
7. Пайкин А. Новые средства контроля состава атмосферы воздушных судов. / А. Пайкин, А. Белов, Б. Файнерман // Двигатель. — 2003. — 3. — с. 14-17.
8. Пат. 2497097 Russian Federation, МПК2011146438 G01N 7/00. Лабораторный комплекс для отбора и газохроматографического анализа проб воздуха / Чулин И.Н., Васильев Ю.В., Смирнова Т.З. и др.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2011146438; заявл. 2011-11-17; опубл. 2013-10-27, Бюл. №30. — 10 с.

9. Пат. 2494366 Russian Federation, МПК2011146439 G01N 1/26. Комплекс для отбора проб воздуха / Чулин И.Н., Васильев Ю.В., Смирнова Т.З. и др.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2011146439; заявл. 2011-11-17; опубл. 2013-09-27, Бюл. №27. — 9 с.

10. Пат. 2495414 Russian Federation, МПК2011146440 G01N 30/78. Комплекс для газохроматографического анализа проб воздуха / Чулин И.Н., Смирнова Т.З., Гусельников Ю.А. и др.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2011146440; заявл. 2011-11-17; опубл. 2013-10-10, Бюл. №28. — 6 с.

11. Пат. 2488816 Russian Federation, МПК2011146442 G01N 30/00. Установка для прокачки поверочной газовой смеси / Чулин И.Н.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2011146442; заявл. 2011-11-17; опубл. 2013-07-27, Бюл. №21. — 7 с.

12. Пат. 2495401 Russian Federation, МПК2011146443 G01N 7/00. Установка для определения активных объемов вакуумируемой части изделия / Чулин И.Н.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2011146443; заявл. 2011-11-17; опубл. 2013-10-10, Бюл. №28. — 5 с.

13. Пат. 144212 Russian Federation, МПК2013156869 F17C 5/00. Установка для подачи газов / Чулин И.Н.; заявитель и патентообладатель ММП им. В.В. Чернышева. — № 2013156869; заявл. 2013-12-23; опубл. 2014-08-10, Бюл. №22. — 10 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST 12.1.005-88 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduhu rabochej zony'. [Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air]. — Introduced 1989-01-01. — М.: Institut standartizacii, 1989. — 78 p. [in Russian]

2. Aviacionny'e pravila. Chast' 23. Normy' letnoj godnosti grazhdanskix legkix samoletov [Aviation regulations. Part 23. Airworthiness standards of civil light aircraft]. — Introduced 1993-01-01. — М.: AVIAIZDAT, 2014. — 207 p. [in Russian]

3. Aviacionny'e pravila. Chast' 25. Normy' letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii [Aviation regulations. Part 25. Airworthiness standards of transport category aircraft]. — Introduced 1994-01-01. — М.: AVIAIZDAT, 2009. — 274 p. [in Russian]

4. Aviacionny'e pravila. Chast' 29. Normy' letnoj godnosti vintokry'ly'x apparatov transportnoj kategorii [Aviation regulations. Part 29. Standards of airworthiness of rotorcraft of the transport category]. — Introduced 1998-03-27. — М.: AVIAIZDAT, 2018. — 180 p. [in Russian]

5. SanPiN 2.5.1.051-96. Gigiena i e'pidemiologiya na transporte. Usloviya truda i otdy'xa dlya letnogo sostava grazhdanskoj aviacii [Hygienic standards and regulations of occupational and rest conditions for civil aviation pilots]. — Introduced 1996-03-19. — М.: Goskomsane'pidnadzor, 1996. — 14 p. [in Russian]

6. MU 1.1.258-99 – Dvigateli gazoturbinnye aviacionnye. Poryadok otbora i gazohromatograficheskogo analiza prob vozduha iz kompressora dvigatelya pri stendovyh ispytaniyah [MU 1.1.258-99 – "Aviation gas turbine engines. The procedure for sampling and gas chromatographic analysis of air samples from the engine compressor during bench tests"]. — Introduced 01.07.2000, NIISU. [in Russian]

7. Pajkin A. Novy'e sredstva kontrolya sostava atmosfery' vozdushny'x sudov [New means of controlling the composition of the atmosphere of aircraft]. / A. Pajkin, A. Belov, B. Fajnerman // Dvigatel' [Engine]. — 2003. — 3. — p. 14-17. [in Russian]

8. Pat. 2497097 Russian Federation, МПК2011146438 G01N 7/00. Laboratorny'j kompleks dlya otbora i gazoxromatograficheskogo analiza prob vozduha [Laboratory complex for sampling and gas chromatographic analysis of air samples] / Чулин И.Н., Васильев Ю.В., Смирнова Т.З. и др.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2011146438; appl. 2011-11-17; publ. 2013-10-27, Byul. №30. — 10 p. [in Russian]

9. Pat. 2494366 Russian Federation, МПК2011146439 G01N 1/26. Kompleks dlya otbora prob vozduha [Complex for Air Sampling] / Чулин И.Н., Васильев Ю.В., Смирнова Т.З. и др.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2011146439; appl. 2011-11-17; publ. 2013-09-27, Byul. №27. — 9 p. [in Russian]

10. Pat. 2495414 Russian Federation, МПК2011146440 G01N 30/78. Kompleks dlya gazoxromatograficheskogo analiza prob vozduha [System for Gas-Chromatographic Analysis of Air Samples] / Чулин И.Н., Смирнова Т.З., Гусельников Ю.А. и др.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2011146440; appl. 2011-11-17; publ. 2013-10-10, Byul. №28. — 6 p. [in Russian]

11. Pat. 2488816 Russian Federation, МПК2011146442 G01N 30/00. Ustanovka dlya prokachki poverochnoj gazovoj smesi [Unit for Pumping Gaging Gas Mix] / Чулин И.Н.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2011146442; appl. 2011-11-17; publ. 2013-07-27, Byul. №21. — 7 p. [in Russian]

12. Pat. 2495401 Russian Federation, МПК2011146443 G01N 7/00. Ustanovka dlya opredeleniya aktivny'x ob'emov vakuumiruemoj chasti izdeliya [Apparatus for Determining Active Volumes of Evacuated Part of Article] / Чулин И.Н.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2011146443; appl. 2011-11-17; publ. 2013-10-10, Byul. №28. — 5 p. [in Russian]

13. Pat. 144212 Russian Federation, МПК2013156869 F17C 5/00. Ustanovka dlya podachi gazov [Installation for Gas Supply] / Чулин И.Н.; the applicant and the patentee MMP named after V.V. Chernyshev. — № 2013156869; appl. 2013-12-23; publ. 2014-08-10, Byul. №22. — 10 p. [in Russian]