

РАЗРАБОТКА ВИХРЕВЫХ АППАРАТОВ ОСУШКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

А. Б. Яковлев

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Показана возможность использования вихревого эффекта для осушки сжатого воздуха, применяемого в различных промышленных установках, в том числе системах термостатирования наземного стартового комплекса. Приведена математическая модель процесса снижения влагосодержания и создана методика расчета оптимальных геометрических размеров вихревого устройства осушки. Представленные в работе результаты позволяют повысить эффективность производственных процессов, использующих сжатый воздух в качестве рабочего тела.

Ключевые слова: стартовый комплекс, пневматические системы, эффект Ранка, вихревой поток, влагосодержание, механическая осушка.

Введение

Во многих технологических машинах в качестве рабочего тела используется сжатый воздух высокого, среднего и низкого давления. Такое распространение воздух получил вследствие своих неоспоримых преимуществ: общедоступность, простота использования и хранения, экологическая и пожаро- и взрывобезопасность, достаточная устойчивость к внешним воздействиям (например, к температуре). Широко применяется сжатый воздух и в оборудовании наземного стартового комплекса [1–3], имеющем среди прочих основных элементов и системы термостатирования воздухом низкого и высокого давления для космической головной части и отсеков ракеты-носителя. В состав этих пневмосистем входят хранилища газов, магистральный трубопровод, ресивер, баллоны, трубопроводы, средства дистанционного контроля параметров рабочего тела (термометры, манометры, гигрометры) и пр.

Однако сжатый воздух имеет и ряд существенных недостатков. Прежде всего, это наличие влаги (воды в жидком и парообразном состоянии), которая затрудняет транспортирование и использование воздуха в технических целях, снижает надежность элементов пневмосистемы. Так как вода является хорошим растворителем, то раствор примесей (масла, агрессивных газов и газовых смесей) в воде создает в замкнутых полостях коррозионно-активную среду, приводящую к быстрому износу механизмов, выходу из строя агрегатов автоматики и управления, ухудшению смазки трущихся поверхностей элементов пневмосистем. Кроме того, в условиях низких температур конденсат может замерзнуть и вызвать отказы, простой оборудования, аварийные ситуации [4, 5]. Еще одним недостатком сжатого воздуха является наличие в нем пыли и других твердых загрязнителей, которые могут привести к абразивному изнашиванию деталей

и эластичных уплотнений, а далее к увеличению утечек.

Указанные недостатки существенно снижают надежность и эффективность работы технологических машин и оборудования, а для систем наземного стартового комплекса могут приводить и к невозможности или приостановке пусков ракет-носителей.

Таким образом, для снижения эксплуатационных расходов производственных процессов, повышения эффективности и надежности функционирования пневматического оборудования, в том числе и наземного стартового комплекса, а также обеспечения высокой надежности пусков ракет космического назначения с головными частями, требующими термостатирования, необходимо применять осушку и очистку сжатого воздуха.

Постановка задачи

В современной экономике одним из важнейших факторов эффективности является энерго- и ресурсосбережение, от которых зависит результативность производственных процессов. С позиции экономии эксплуатационных затрат на основе энерго- и ресурсосбережения рассматривается возможность использования для осушки сжатого воздуха вихревого эффекта.

Для того, чтобы избежать неблагоприятного влияния находящейся в воздухе влаги на различные технологичные пневмосистемы и процессы, необходимо исключить возможность образования твердой и жидкой фаз воды. В современной технике для осушки сжатого воздуха используют следующие основные методы:

- механический;
- адсорбционный;
- физический.

Каждый из методов не лишен недостатков, но имеет и ощутимые преимущества перед другими.

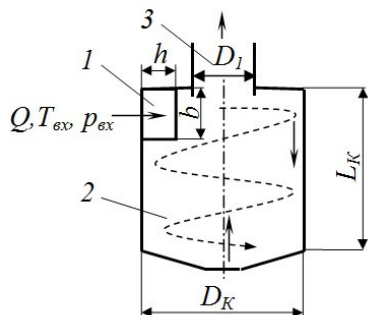


Рис. 1. Схема вихревой камеры
Fig. 1. Scheme of the vortex chamber

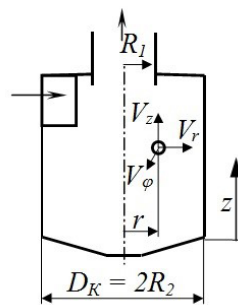


Рис. 2. Расчетная модель вихревой камеры
Fig. 2. Computational model for vortex chamber

Например, абсорбционный метод очень эффективен, т.к. основан на свойстве силикагелевого фильтра поглощать воду и водяной пар. Однако использование фильтров приводит к большой потере полного давления, что ведет к увеличению энергозатрат, а также существенным недостатком этого метода является большая стоимость фильтров и необходимость их своевременной замены. Механический метод прост, экологичен, производителен и малозатратен, однако уступает по эффективности адсорбции. Именно в повышении эффективности механического метода некоторые авторы [6] видят направление дальнейшего развития способов осушки сжатого воздуха. Большое распространение на практике получило использование вихревых камер для осушки воздуха и газов [7, 8], основанных на механическом методе. Применение закрученного потока не требует дополнительных затрат и времени на обслуживание, замены элементов, системы осушки, при этом не имеет движущихся частей. Для этого способа характерны также небольшие потери давления.

В связи с вышеизложенным основной целью работы являлась разработка эффективного устройства для осушки воздуха и расчет его оптимальных параметров.

Теория

Устройство осушки представляет собой вихревую камеру (рис. 1) с тангенциальным входным соплом 1 прямоугольного сечения высотой h и шириной b . Длина и диаметр цилиндрической части 2 камеры равны соответственно L_K и D_K , а ее диафрагма 3 имеет диаметр D_1 . Для расчета приняты следующие исходные данные: объемный расход воздуха Q , его температура T_{ex} и давление p_{ex} , геометрические характеристики камеры (длина L_K и диаметр D_K) и давление среды, в которую происходит истечение, p_a .

На вход в сопло поступает влажный воздух под избыточным давлением. При истечении из тангенциально расположенного сопла двухфазной газожидкостной смеси в камере устройства возникает вихревое течение, состоящее из газового осевого потока и конденсирующейся на поверхности боковой стенки камеры пленки жидкости. Таким образом вводимый через сопло вместе с воздухом конденсат под действием поля центробежных сил перемещается к периферии

вихревого потока и осажается на стенке, а влагосодержание осевого потока будет значительно снижаться. При этом часть находящейся в пленке жидкости может стекать по торцевым стенкам вихревой камеры за счет гравитационной силы в ее нижнюю часть. Пленка жидкости будет формироваться в периферийных сечениях вихревой камеры, близких к соплу, вследствие того, что тангенциальная (касательная) скорость V_ϕ потока воздуха будет иметь максимальное значение на наибольшем радиусе, т.е. по оси сопла. В удаленных по отношению к входному соплу сечениях камеры пленка жидкости может разрушаться, происходит срыв потоком воздуха капель влаги и их унос в приосевую часть.

В итоге в устройстве осушки устанавливается движение двух взаимно противоположных вдоль оси камеры потоков: периферийного, слой которого нагревается, и осевого, охлажденного. Описанный эффект получил название вихревого (эффекта Ранка–Хилша) [7]. Наличие такого радиального градиента температур вызывает конденсацию жидкой фазы в приосевом потоке, а выделяющаяся при этом теплота повышает температуру осевого потока. Часть мелкодисперсных капель влаги не успевает переместиться за счет центробежных сил в периферийный поток из осевого и будет покидать устройство через диафрагму вихревой камеры вместе с охлажденным воздухом осевого потока. Большая часть капель влаги попадает на периферию камеры и оседает в виде жидкой пленки либо испаряется. В результате процесса испарения снижается температура периферийных слоев.

Описанные процессы теплообмена (конденсация на оси и испарение на периферии устройства) происходят одновременно и снижают температурный градиент в радиальном направлении вихревой камеры, т.е. частично взаимокompенсируются. А процесс разделения потока воздуха на жидкую и осушенную часть будет идти в основном за счет действия центробежных сил.

Эффективность процесса осушки будет определяться не только параметрами воздушного потока на входе в устройство (расход, давление, температура, влагосодержание), но и от его геометрических размеров.

Таким образом, наличие радиального градиента температур в вихревой камере разделения (эффект Ранка–Хилша), процессов испарения

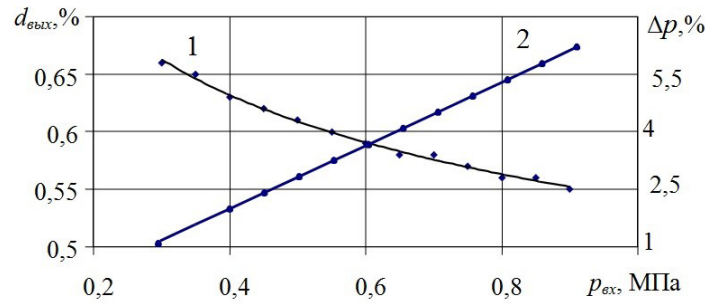


Рис. 3. Графики зависимостей от давления на входе $p_{\text{вх}}$:
 1 — влагосодержание воздуха на выходе $d_{\text{вых}}$;
 2 — потери давления в устройстве Δp
 Fig. 3. Graphs of dependencies on the pressure at the inlet $p_{\text{вх}}$:
 1 — moisture content of the outlet air $d_{\text{вых}}$;
 2 — pressure loss in device Δp

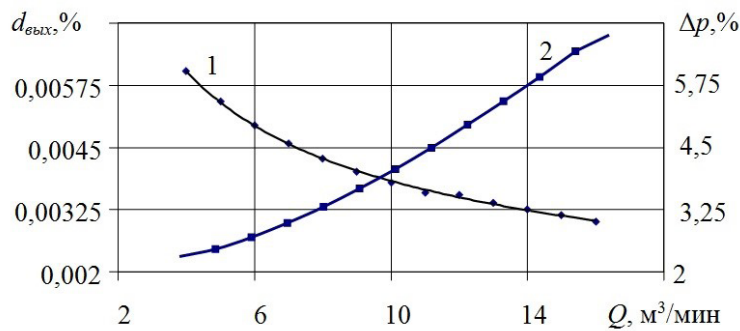


Рис. 4. Графики зависимостей от расхода на входе Q :
 1 — влагосодержание воздуха на выходе $d_{\text{вых}}$;
 2 — потери давления в устройстве Δp
 Fig. 4. Graphs of dependencies on the flow at the input Q :
 1 — moisture content of the outlet air $d_{\text{вых}}$;
 2 — pressure loss in device Δp

и конденсации, срыв и разрушение пленки жидкости вдали от соплового сечения, сток жидкости по боковой стенке в приосевую зону будут снижать эффект влагоотделения.

Так как эффективность отделения влаги в вихревом устройстве будет зависеть от соотношения осевой V_z и тангенциальной (касательной) V_ϕ составляющих скорости воздушного потока, эффективность влагоотделения будет зависеть от отношения расхода осевого потока к общему расходу воздуха на входе μ . При малых значениях μ центробежные силы будут значительны, касательная составляющая скорости потока велика, а осевая составляющая, наоборот, минимальна, основная часть влаги будет отбрасываться к стенкам вихревой камеры и перемещаться вместе с периферийным потоком. С увеличением скорости осевого потока и, соответственно, доли осевого потока μ произойдет рост количества влаги, унесенной с осевым потоком.

Результаты экспериментов

При описании процессов в вихревой камере осушки (рис. 2) рассматривается осесимметрич-

ное движение вязкой сжимаемой жидкости. При этом касательная и радиальная составляющие скорости будут функциями от радиуса камеры: $V_\phi = V_\phi(r)$ и $V_r = V_r(r)$, а осевая составляющая V_z (по оси камеры z) и осевой градиент давления не зависят от радиуса. В вихревой камере можно пренебречь изменением давления по оси, поэтому плотность потока будет зависеть только от радиуса: $\rho = \rho(r)$. С целью упрощения рассматривается изотермический случай, т.е. с постоянным значением вязкости.

Расчет проводился вне пограничного слоя боковых стенок вихревой камеры для установившегося потока, имеющего значения составляющих скорости (см. рис. 2) при $r = R_2$; $V_\phi = V_{\phi 2}$; $V_r = V_{r 2}$; $V_z = V_{z 2}$.

При такой постановке вопроса уравнения неразрывности и Навье – Стокса должны быть дополнены недостающими граничными условиями:

— на нижнем днище камеры отсутствует осевое движение воздуха, т.е. при $z = 0$, $V_z = 0$;

— воздух выходит из камеры через центральное отверстие (диафрагму) радиусом R_1 в верхнем торцевом днище, т.е. при $z = L_K$, $R_1 \leq r \leq R_2$ и $V_z = 0$;

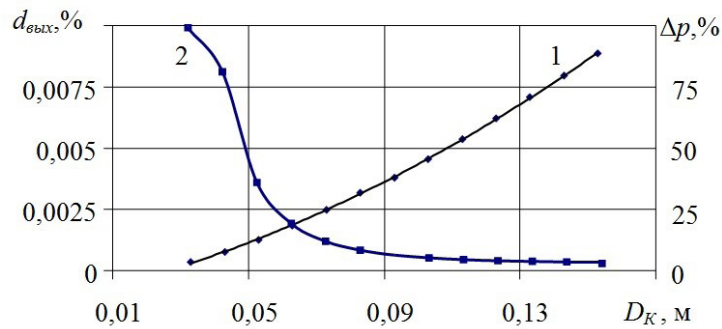


Рис. 5. Графики зависимостей от диаметра камеры D_K :
1 — влагосодержание воздуха на выходе $d_{\text{вых}}$;
2 — потери давления в устройстве Δp

Fig. 5. Graphs of dependencies on the chamber diameter D_K :
1 — moisture content of the outlet air $d_{\text{вых}}$;
2 — pressure loss in device Δp

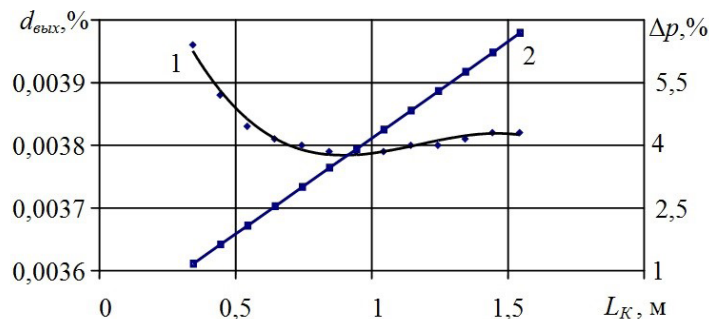


Рис. 6. Графики зависимостей от длины камеры L_K :
1 — влагосодержание воздуха на выходе $d_{\text{вых}}$;
2 — потери давления в устройстве Δp

Fig. 6. Graphs of dependencies on the chamber length L_K :
1 — moisture content of the outlet air $d_{\text{вых}}$;
2 — pressure loss in device Δp

— из условия симметрии задачи вытекает, что на оси при $r = 0$, $V_r = V_\phi = 0$.

На основании данной математической модели создана методика расчета оптимальных геометрических параметров устройства осушки. Решение подобной системы уравнений является громоздким [9], поэтому методика расчета сжимаемого течения построена на объединении теоретических и экспериментальных результатов. На основании построенной математической модели составлены методики расчета газодинамических параметров и оптимальных размеров вихревого устройства осушки и создана программа для ЭВМ.

Результаты расчета для случая подачи влажного воздуха (влагосодержание $d = \rho_c / \rho_b$, где ρ_c — плотность сухого газа, ρ_b — плотность водяного пара) на вход в вихревую камеру с параметрами $Q = 10 \text{ м}^3/\text{мин}$, $T_{\text{вх}} = 293 \text{ К}$, $p_{\text{вх}} = 0,6 \text{ МПа}$, $d_{\text{вх}} = 0,64$, дали следующие оптимальные размеры камеры при влагосодержании воздуха на выходе $d_{\text{вых}} = 0,004$: $L_K = 0,943 \text{ м}$, $D_K = 0,093 \text{ м}$, $h = 0,037 \text{ м}$, $b = 0,018 \text{ м}$.

В процессе варьирования исходными данными в области оптимальных значений были получены зависимости влагосодержания на выходе устройства $d_{\text{вых}}$ и потерь давления в устройстве Δp от следующих параметров: давления на входе в камеру вихревого устройства (рис. 3), расхода воздуха на входе в устройство (рис. 4), диаметра вихревой камеры (рис. 5) и длины вихревой камеры (рис. 6).

Обсуждение результатов

Полученные зависимости (см. рис. 3–6) показывают, что влагосодержание снижается с увеличением расхода и давления на входе, а также с уменьшением диаметра камеры. Это связано с интенсификацией процессов закрутки, увеличением тангенциальной составляющей скорости потока. Однако потери давления при этом возрастают. При уменьшении длины камеры от оптимального значения влагосодержание резко возрастает, так как влага не успевает конденсироваться на стенках. С увеличением длины

камеры от оптимальной величины начинается процесс разрушения пленки жидкости и срыва капель в приосевую область, что приводит к возростанию влагосодержания.

Выводы и заключение

Разработанная модель и составленная на ее основе методика расчета позволяют определять оптимальные параметры подачи воздуха и геометрические размеры вихревого устройства для осушки сжатого воздуха, исходя из минимального влагосодержания при условии невысоких гидравлических потерь ($\Delta p \leq 10\%$). Применение данных устройств позволяет повысить эффективность и результативность производственных процессов, использующих сжатый воздух в качестве рабочего тела. Эксплуатационные расходы будут снижаться, повысится надежность работы пневмооборудования, в том числе систем термостатирования наземного стартового комплекса.

Список источников

1. Бельков В. Н., Краус Ю. А., Ланшаков В. Л. Синтез и анализ конструктивно-компоновочных схем стартовых комплексов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 102 с. ISBN 5-8149-0519-0.
2. Бирюков Г. П., Гранкин Б. К., Козлов В. В. [и др.]. Основы проектирования ракетно-космических комплексов. Методология обоснования облика комплексов. СПб.: АЛФАВИТ, 2002. 320 с.
3. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: инженерное пособие. В 2 кн. / под общ. ред. И. В. Бармина. М.: Полиграфикс РПК, 2006. Кн. 2. 376 с.
4. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Осушка сжатого воздуха в пневмомагистралях УЗОТ ПТО вагонных депо // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 1 (29). С. 18–22.

5. Галюжин А. С. Повышение безопасности пневмоприводов путем увеличения степени осушки сжатого воздуха // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 2 (51). С. 6–14.

6. Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф. Оценка и анализ конкурентоспособности различных методов осушки сжатого воздуха // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2 (23). С. 86.

7. Суслов А. Д., Иванов С. В., Мурашкин А. В. [и др.]. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

8. Надеев А. А., Бараков А. В., Дубанин В. Ю. [и др.]. Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдоожиженным слоем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 2. С. 44–50.

9. Смульский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука, 1992. 301 с. ISBN 5-02-030300-3.

ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».
SPIN-код: 8194-5800
AuthorID (РИНЦ): 488687
ORCID: 0000-0002-1987-2138
AuthorID (SCOPUS): 56503089200
ResearcherID: E-7451-2014
Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

Для цитирования

Яковлев А. Б. Разработка вихревых аппаратов осушки сжатого воздуха для систем наземного стартового комплекса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116.

Статья поступила в редакцию 05.03.2020 г.
© А. Б. Яковлев

DEVELOPMENT OF VORTEX COMPRESSED AIR DRYING DEVICES FOR GROUND LAUNCH COMPLEX SYSTEMS

A. B. Yakovlev

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The possibility of using the vortex effect for drying compressed air used in various industrial installations including systems for thermostating ground launch complexes is shown. A mathematical model of the process of reducing the moisture content is presented and a method for calculating the optimal geometric dimensions of the vortex drying device is created. The results presented in this paper allow us to increase the efficiency of production processes that use compressed air as a working fluid.

Keywords: launch complex, pneumatic system, Ranque effect, vortex flow, moisture content, mechanical drying.

References

1. Belkov V. N., Kraus Yu. A., Lanshakov V. L. Sintez i analiz konstruktivno-komponovochnykh skhem startovykh kompleksov [Synthesis and Analysis of Design and Layout Schemes of Launch Complexes]. Omsk: OmSTU Publ., 2008. 102 p. ISBN 5-8149-0519-0. (In Russ.).

2. Biryukov G. P., Grankin B. K., Kozlov V. V. [et al.]. Osnovy proyektirovaniya raketno-kosmicheskikh kompleksov. Metodologiya obosnovaniya oblika kompleksov [Basics of designing rocket and space complexes. Methodology for substantiating the appearance of complexes]. St. Petersburg, 2002. 320 p. (In Russ.).

3. Tekhnologicheskkiye ob"yekty nazemnoy infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki: inzhenernoye posobiye [Technological Objects of Ground Infrastructure of Rocket and Space Technology: Engineering Manual]. In 2 bks. / Ed. I. V. Barmin. Moscow, 2006. Bk. 2. 376 p. (In Russ.).

4. Ripol-Saragosi L. F. Osushka szhatogo vozdukh v pnevmomagistralyakh UZOT PTO vagonnykh depo [Drying of Compressed Air in Pneumatic Lines of DCTB LTE of Car Depots] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2008. No. 1 (29). P. 18–22. (In Russ.).

5. Galyuzhin A. S. Povysheniye bezopasnosti pnevmoprivodov putem uvelicheniya stepeni osushki szhatogo vozdukh [Improvement of safety of pneumatic actuators by increasing the degree of compressed air drying] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta*. 2016. No. 2 (51). P. 6–14. (In Russ.).

6. Ripol-Saragosi T. L., Ripol-Saragosi L. F. Otsenka i analiz konkurentosposobnosti razlichnykh metodov osushki szhatogo vozdukh [Competitiveness evaluating and analysis for different compressed air drying methods] // Inzhenernyy vestnik Dona. *Engineering Journal of Don*. 2012. No. 4-2 (23). P. 86. (In Russ.).

7. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V. [et al.]. Vikhrevyye apparaty [Vortex Devices]. Moscow, 1985. 256 p. (In Russ.).

8. Nadeev A. A., Barakov A. V., Dubanin V. Yu. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye protsessa sushki silikagelya v apparate s tsentrobezhnym psevdoozhizhennym sloym [Experimental study of the silica gel drying process in the apparatus with centrifugal fluidized bed] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018. Vol. 14, no 2. P. 44–50. (In Russ.).

9. Smulskiy I. I. Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh [Aerodynamics and Processes in Vortex Chambers]. Novosibirsk, 1992. 301 p. ISBN 5-02-030300-3. (In Russ.).

YAKOVLEV Aleksey Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Aviation and Rocketry Department.

SPIN-code: 8194-5800

AuthorID (RSCI): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Address for correspondence: yakovlev@omgtu.ru

For citations

Yakovlev A. B. Development of vortex compressed air drying devices for ground launch complex systems // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116.

Received March 5, 2020.

© A. B. Yakovlev