

УДК 629.7.036.3

ББК 39.15

**ПРОБЛЕМЫ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
В ОЖИДАЕМЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Антон Геннадьевич Киренчев

**Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал)**

Иркутск, Россия

antonkirenchev25@mail.ru

Николай Владимирович Даниленко

кандидат технических наук, доцент

**Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал)**

Иркутск, Россия

danko_irk@mail.ru

В статье исследуются противоречия, проблемы и методы технического обслуживания современных воздушных судов гражданской авиации. По факту увеличения расхода воздуха через двигатели установлен качественный переход вихреобразования перед воздухозаборниками к вихрям размытой интенсивности. Предлагаются новые направления наземной эксплуатации воздушных судов при работе их газотурбинных двигателей на земле. В рамках требований Международной организации гражданской авиации, Авиационных правил и Норм лётной годности исследованы противоречия наземной эксплуатации ВС и их двигателей и изложены основы новых дополнений к

Наставлению по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России.

Ключевые слова: вихреобразование, роль подстилающей поверхности, газотурбинные силовые установки, сила Кориолиса, воздухозаборник, техническая эксплуатация, эрозионный износ.

**PROBLEMS OF CIVIL AVIATION AIRCRAFT MAINTENANCE PROCESSES IN
EXPECTED OPERATING CONDITIONS**

Anton Gennad’evich Kirenchev

Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation

Irkutsk, Russia

antonkirenchev25@mail.ru

Nikolaj Vladimirovich Danilenko

Candidate of Engineering Sciences,

associate professor

Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation

Irkutsk, Russia

danko_irk@mail.ru

The article explores the contradictions, problems and methods of maintenance of modern civil aviation aircraft. After increasing the air flow through the engines, a qualitative transition of vortex formation before the air intakes to vortices of blurred intensity was established. New directions for aircraft ground operation when gas turbine engines are running on the ground are suggested. Within the framework of the requirements of the International Civil Aviation Organization, Aviation Rules and Airworthiness Standards, the contradictions of aircraft ground operation and their engines are investigated and new additions to the Manual on technical operation and repair of aviation equipment in Russian civil aviation are outlined.

Keywords: vortex formation, the role of the underlying surface, gas turbine power plants, Coriolis force, air intake, technical operation, erosive wear.

Введение

История развития авиации РФ и её двигателестроения насыщена переходными этапами от ТРД I-го до ТРДД и их модификаций IV-го поколения. На смену простейшим ТРД с малонапорными осевым и центробежным компрессором [Большая Российская энциклопедия, 2020] пришли более мощные турбореактивные двигатели II, III и IV-го поколений [Зрелов, 2002, с. 210]. Анализ секундного массового расхода воздуха газотурбинных двигателей (ГТД) по годам их выпуска позволяет установить тенденцию увеличения данного параметра, что показано на рисунке 1.

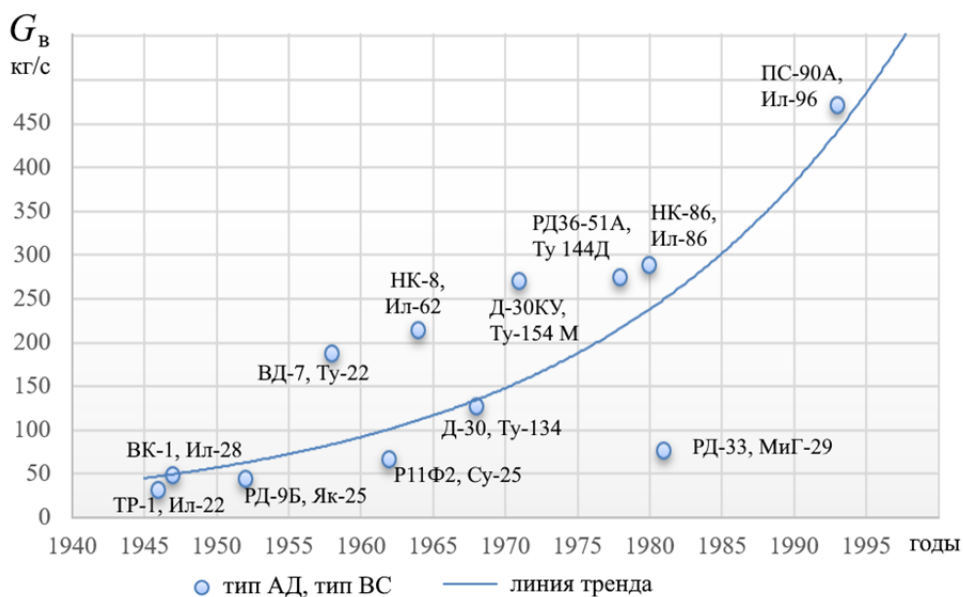


Рисунок 1 – Изменения расхода воздуха через двигатели в зависимости от их года выпуска

По линии тренда (рис. 1) видна экспоненциальная зависимость расхода воздуха G_B от года выпуска авиационных двигателей. Следовательно, их развитие и совершенствование также сопровождается ростом расхода воздуха через вход в воздухозаборный канал ГТД. Этот путь позволяет достичь больших значений тяги и мощности на выводном навалу при меньших затратах топлива. Он также является генератором новых технических проблем

Возросший расход воздуха G_B , активировал стоковую деятельность воздухозаборников (ВЗ) газотурбинных двигателей. А наличие подстилающей поверхности (земли, аэродрома, ...) стало генератором и аккумуляцией вихревой активности стокового течения, представляемой в лице его вихрей.

Появилось первое противоречие наземной эксплуатации газотурбинных двигателей на земле на повышенных режимах работы. Стоковые вихри с их свойством замыкаться на ближайшую подстилающую поверхность [Ништ, 1994; Даниленко, 2018; Даниленко, 2015] сначала срывали с обслуживающих специалистов, работающих на входе в ВЗ, головные уборы, технические перчатки (погоны, шевроны, ...) и засасывали их в компрессор ГТД. Иногда за ними «следовал» и технический персонал (рис. 2 а).

Попадание посторонних предметов (ПП) в ГТД приводило не только к нарушению рабочих планов авиапредприятий, но являлось причиной досрочного снятия двигателей с эксплуатации (ДСД) по причине повреждения элементов их проточной части (рис. 2 б). Не исключён помпаж компрессора (рис. 2 в) и ГТД. Проблема ДСД не только мешала плановой лётной эксплуатации ВС, но и их техническому обслуживанию (ТО) на земле.



а – вихревое засасывание посторонних предметов и персонала; б – повреждение лопаток компрессора двигателя; в – помпаж ТРДД

Рисунок 2 – Проблемы вихревого засасывания

Проблемы состояния исследования вихревого засасывания посторонних предметов и его влияния на ТО ВС на земле

Проблему вихревого засасывания ПП, песка и пыли исследовало множество учёных. В результате их изысканий были установлены основные условия существования вихрей [Комов, 2008; Комов, 2014; Даниленко, 2011]:

1) наличие активного течения стокового потока, например, генерируемого работой компрессора ГТД на повышенных режимах;

2) наличие входного канала с поджатием струек тока и активным разрежением на его входе;

3) наличие подстилающей поверхности с поджатием струек тока стокового потока и способностью замыкать на себя свободные вихри, к ней стремящиеся (следствие теоремы Гельмгольца);

4) газодинамическое свойство вихря ВЗ по следствиям Гельмгольца – быть газодинамически замкнутым на вход в компрессор ГТД;

5) наличие оптимальной компоновки подстилающей поверхности аэродрома (земли) и воздухозаборника по относительной высоте $H_{отн}$, генерирующей сильный (ϵ) вихрь (вихри), способный (ϵ) засасывать ПП, камешки и мелкие абразивные частицы, разрушающие элементы проточной части ГТД и вести его к досрочному снятию двигателей.

Следует отметить, что знание условий 1, ..., 5 существования вихрей ВЗ является необходимым, но не достаточным требованием реализации вихревого засасывания ПП, песка и пыли.

Условно достаточными для решения проблемы вихревого засасывания мелких ПП, песка и пыли являются:

1) чистота подстилающей поверхности, чего практически добиться невозможно;

2) локальное складирование мелких ПП, песка и пыли в специально профилированных элементах поверхности ВПП, рулѐжных дорожек и газочных площадок.

3) внедрение новых технологий по способам уборки подстилающих поверхностей с переходом от режима «подметания» и «струйного сдува» к режиму стокового забора (пылесоса), «вертикально ориентированного струйного выдува» песка и пыли с последующей их утилизацией.

Следствия и выводы, предложенные выше, служат опорой для разработки основных мер по предотвращению вихревого засасывания посторонних предметов и более качественной уборки рабочих поверхностей аэродрома.

Первая мера, это известные средства, не дающие вихрю замкнуться на поверхность аэродрома. К ним относятся поверхность фюзеляжа, выдвижные щитки, устанавливаемые под воздухозаборником и служащие промежуточной подстилающей поверхностью. К средствам, разрушающим и ослабляющим вихрь ВЗ, можно отнести естественный фронтальный ветер, превышающий скорость 7 м/с, либо стационарный струйный сдув вихря у подстилающей поверхности плоским потоком с той же скоростью.

Вторая мера – отсос исходной вихревой активности стокового потока наземными средствами в поле точки мнимого стока под ВЗ. Этот способ наиболее радикален, требующий серьезных конструктивных изменений аэродромного покрытия в местах проявления стоковой вихревой активности двигателя.

Третья мера – это понижение высоты воздухозаборника авиационного двигателя над поверхностью аэродрома, что позволяет уйти от зоны мощного вихреобразования в зону снижения его вихревой активности (рис. 3, штриховая линия на поле условной вихревой характеристики $V_{\Gamma \max} = f(\bar{H})$).

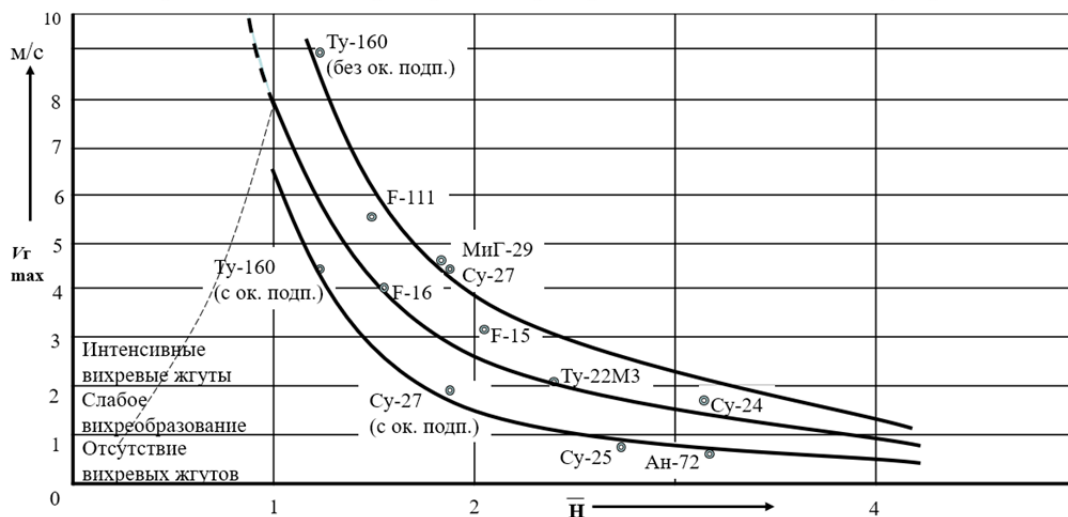


Рисунок 3 – Зависимость силы вихря от относительной высоты воздухозаборника авиационного двигателя над подстилающей поверхностью

Опираясь на эти меры по снижению вихревой активности ВЗ ГТД на земле, а также на результаты опытных испытаний, конструкторы ВС различного назначения постепенно начали переходить к низкому расположению воздухозаборников над поверхностью аэродрома. Это стало заметным по тенденции (тренду) зависимости относительной высоты $\bar{H}_{отн}$ воздухозаборников авиационных двигателей по годам их выпуска над поверхностью аэродрома, представленной на рис. 4.

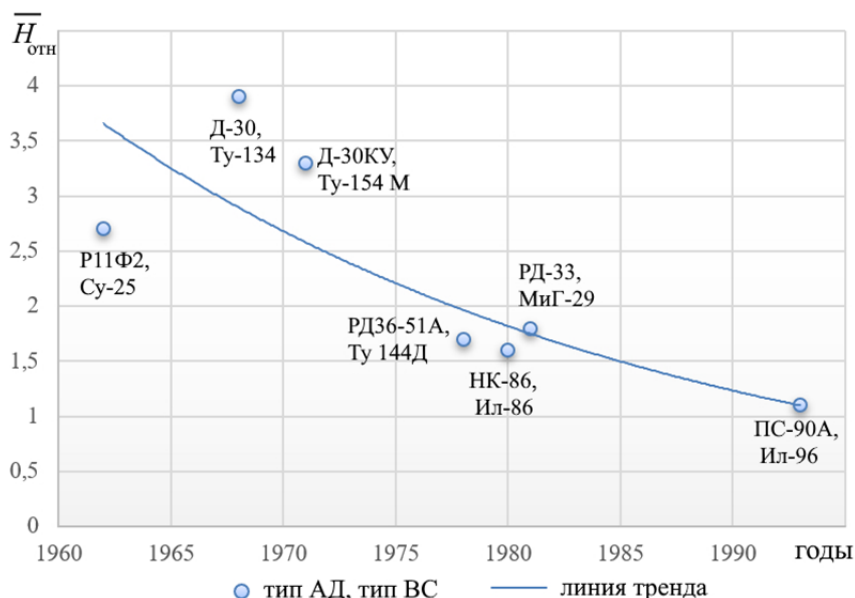


Рисунок 4 – Изменение относительной высоты авиационного двигателя над подстилающей поверхностью в зависимости от их года выпуска

Указанная тенденция к использованию низкого расположения воздухозаборников очевидна по компоновке силовой установки зарубежных самолётов. Благодаря такому техническому решению, мощное одиночное вихреобразование под воздухозаборниками современных ВС стало переходить в разряд мелких вихрей и вихрей размытой интенсивности (рис. 5). И это доказуемо.



Рисунок 5 – Сравнение вихрей при высоком (а) и низком (б) расположении воздухозаборника авиационного двигателя над поверхностью аэродрома

По определению известна закономерность взаимосвязи погонной плотности циркуляции γ вихревой трубки с тангенциальной скоростью потока c_τ на её внешней границе.

$$\gamma = \Gamma_B / l_{к.ц} = c_\tau 2\pi r / (2\pi r) = c_\tau.$$

По погонной плотности циркуляции γ вихревой трубки заметна следующая закономерность. С ростом радиуса r вихревой трубки и длины контура $l_{к.ц}$ её циркуляции при постоянной циркуляции вихря Γ_B активный вихрь ВЗ превращается в вихрь размытой интенсивности.

Тангенциальная скорость c_τ внешнего потока у её стенки активно снижается. Следовательно, снижается и вихревая активность вихря ВЗ. Активный вихрь превращается в вихрь размытой интенсивности и теряет способность к вихревому засасыванию.

Указанная закономерность реализуется при уменьшении относительной высоты ВЗ над поверхностью аэродрома, что уже внедрено на силовых установках ВС последнего поколения (рис. 5).

Обладая достаточным разрежением потока на входе в компрессор и в воздухозаборник, а также их близостью к подстилающей поверхности, авиационный двигатель переходит в так называемый в быту режим работы «пылесоса». Как следствие, возрастает количество мелких засасываемых частиц песка и пыли непосредственно с поверхности аэродрома под воздухозаборником. Небольшие количества песка и пыли не наносят серьезных повреждений тонкостенным рабочим лопаткам двигателя. При постоянном воздействии этих частиц происходит абразивный и эрозионный износ рабочих лопаток (рис. 6). Следовательно, проблема ПП превратилась в проблему так называемого специалистами эрозионного износа.



Рисунок 6 – Эрозионный износ лопаток компрессора мелкими посторонними предметами и частицами песка и пыли

Основной проблемой технического обслуживания воздушных судов с низким расположением воздухозаборников на современном этапе является отсутствие понимания специалистами физической сущности и рабочего процесса стоковых течений под их входом на малых высотах, основы которого были заложены в предыдущей работе авторов [Киренчев, 2019]. По этой причине, в современных документах, нормирующих техническое обслуживание [Авиационные правила. Часть 25, 2011; НТЭРАТ ГА-93, 1993] воздушных судов, не учитываются методы борьбы с абразивными частичками песка и пыли, вызывающими эрозионный износ. Также не учитывается и другой

фактор, исследованный в работах авторов, такой как влияние силы Кориолиса на постоянно действующий процесс засасывания абразива в поле отклоняющего действия на стоковый поток силы Кориолиса [Киренчев, 2018, с. 23-32].

Ссылаясь на результаты работы, можно сделать вывод, что влияние исследуемых факторов доказано и требует их учёта при проведении различных процедур обслуживания воздушного судна на аэродроме, а также иного подхода к разработке образцов аэродромных уборочных машин на принципах всасывающего типа.

Предлагаемые дополнения к Наставлению по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России

Эффективное обслуживание воздушного судна является залогом его долгой эксплуатации с минимальным уровнем рисков возникновения авиационных происшествий и инцидентов. Обеспечение такого обслуживания требует учёта всех возможных факторов, которые влияют на воздушное судно в ожидаемых условиях его эксплуатации. Как упоминалось выше, авторами были выявлены факторы, не учитываемые в современных нормативных документах по технической эксплуатации. Это может привести к снижению эффективности технического обслуживания в рамках поддержания лётной годности [Авиационные правила. Часть 25, 2011]. Следовательно, появилась потребность в дополнениях к существующим нормативным документам.

Первое дополнение – это исключение доставки на аэродром инженерно-техническим персоналом и транспортом наземного обслуживания мелких посторонних предметов и абразива в виде песка и пыли. Как видно из рисунка 7 а, поверхность шин современных машин, используемых для различного обслуживания ВС, на аэродроме имеет протектор, способный к контактному захвату мелкого гравия и влажной почвы с абразивом. Такой же характер контактной поверхности обуви инженерно-технического персонала (рис. 7 б). В зазоры протектора на поверхности шин и подошв обуви при силовом контакте

могут вдавливаясь различные посторонние предметы, принесенные с других частей аэродрома или прилежащих к нему территорий. Это представляет потенциальную опасность для ГТД, работающих на режимах вихревого и стокового засасывания.



Рисунок 7 – Внешняя форма поверхности шин средств наземного обслуживания (а) и обуви авиационного персонала (б)

Следовательно, для предотвращения попадания указанным путём посторонних предметов и абразива на эксплуатируемые технические площадки аэродрома необходимо использовать не рифлёную, а более гладкую поверхность шин средств наземного обслуживания и подошв обуви авиационно-технического персонала.

Второе дополнение касается уборочной техники. Современная уборочная техника (рис. 8) рассчитана на уборку и сдвиг посторонних предметов, но не способна полностью убрать пыль и песок с поверхности аэродрома. Она лишь поднимает её в воздух, а после прохождения уборочной машины данные частички вновь оседают на поверхность аэродрома. Следовательно, необходимо использовать уборочные машины, работающие по принципу активной стоковой уборки типа «пылесоса». То есть поднятые струйным потоком уборочной машины частички пыли и песка сепарируются и складываются в контейнеры с последующей утилизацией. Данные машины должны очищать поверхность аэродрома вслед за стандартными машинами по уборке, выполняя своеобразную двухэтапную очистку – сначала от посторонних предметов, потом от абразива – песка и пыли. Данное дополнение

позволит снизить вероятность возникновения эрозионного износа ГТД, повысить лётную годность и безопасность полётов.



Рисунок 8 – Уборочные машины современной аэродромной техники

Третье дополнение касается учёта влияния силы Кориолиса на процесс образования вихря. Известно, что постоянное суточное вращение Земли с её ускорением и отклоняющей силой Кориолиса – действующий фактор на вихревую активность стоковых течений как естественного, так и техногенного происхождения, ведущий к образованию вихрей [Тарг, 1986]. Направление их вращения влияет на газодинамическую устойчивость двигателя. Следовательно, во избежание возникновения помпажа при опробовании двигателя на аэродроме при наличии под воздухозаборником вихря антициклонического вращения следует замедлить темпы приёмистости и следить за отсутствием акустических и иных предвестников помпажа. При их активации двигатель выключить.

И последнее дополнение касается способов снижения вероятности засасывания в воздухозаборник инженерно-технического персонала. Для этого при опробовании двигателя следует переднюю кромку обечайки по её контуру высветить проблесковыми маячками красного цвета, которые позволят инженерно-техническому персоналу заметить работающий двигатель даже в шумных условиях, создаваемых двигателями других воздушных судов.

Заключение

Дополнения, предложенные в данной статье, позволят повысить эффективность технического обслуживания и эксплуатации воздушных судов на аэродроме. Результаты и предложения настоящей статьи сыграют положительную роль в поддержании лётной годности, так как они непосредственно относятся к элементам технического обслуживания воздушных судов в ожидаемых условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Авиационные правила. Часть 25. Нормы лётной годности самолетов транспортной категории (утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 11.12.2008).
2. Аэродинамика боевых летательных аппаратов и гидравлика их систем / под ред. М. И. Ништа. М.: ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1994. 570 с.
3. Большая Российская энциклопедия // [Электронный ресурс]. – 2020. URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/400861 (дата обращения 27.02.2020).
4. Даниленко Н. В. Вихреобразование стоковых течений / Н. В. Даниленко, А. Г. Киренчев // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 28-36.
5. Даниленко Н. В. Математическое моделирование интерференционных вихрей воздухозаборников / Н. В. Даниленко, С. В. Пахомов, А. М. Сафарбаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 1 (45). С. 148-159.
6. Даниленко Н. В. Теория вихрей перед воздухозаборниками самолётов при работе газотурбинных двигателей на аэродроме: монография / Н. В. Даниленко, П. М. Кривель, С. В. Пахомов, А. М. Сафарбаков, М. М. Федотов. 2-е изд., испр. и доп. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2011. 348 с.
7. Зрелов В. А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы (Часть I): учеб. пособие. Самара: Самар., гос. аэрокосмический ун-т., 2002, 210 с.
8. Киренчев А. Г. Особенности интерференции вихрей воздухозаборников газотурбинных силовых установок с подстилающей поверхностью / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2019. № 4. С. 74-85.
9. Киренчев А. Г. Особенности рабочего процесса вихрей газотурбинных силовых установок / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 55. С. 23-32.

10. *Комов А. А.* Основные закономерности повреждения лопаток компрессоров авиационных ГТД посторонними предметами / А. А. Комов, Г. Г. Белоусов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. № 134. С. 25-34.

11. *Комов А. А.* Уровень защищенности авиационных двигателей отечественных воздушных судов от повреждений посторонними предметами / А. А. Комов, С. П. Юрин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 42-48.

12. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-93).

13. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1986. 416 с.

References

1. Air dynamics of combat aircraft and hydraulics of their systems / ed. by M. I. Nisht. M.: Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1994. 570 p. (In Russian).

2. Aviation rules. Part 25. Airworthiness standards for transport category aircraft" (enacted by Resolution of the 28th session of the Council on aviation and the use of airspace dated 11.12.2008) (In Russian).

3. Big Russian encyclopedia // [Electronic source]. - 2020. URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/400861 (date of access: 27.02.2020). (In Russian).

4. *Danilenko N. V.* (2011) Theory of vortices in front of the air intakes when operating gas-turbine engines at the aerodrome: monograph / N. V. Danilenko, P. M. Krivel', S. V. Pahomov, A. M. Safarbakov, M. M. Fedotov. Ed. 2 (add.). Irkutsk: MSTU CA (Irk. Branch), 2011. 350 p. (In Russian).

5. *Danilenko N. V.* Mathematical modeling of interference vortices of air intakes / N. V. Danilenko, S. V. Pakhomov, A. M. Safarbakov // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 1 (45). Pp. 148-159. (In Russian).

6. *Danilenko N. V.* Vortex formation of runoff flows / N. V. Danilenko, A. G. Kirenchev // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2018. Vol. 25. No. 4. Pp. 28-36. (In Russian).

7. *Kirenchev A. G.* Features of interference of vortices of air intakes of gas turbine power plants with an underlying surface / A. G. Kirenchev, N. V. Danilenko // Crede Experto: transport, society, education, language. 2019. No. 4. Pp. 74-85. (In Russian).

8. *Kirenchev A. G.* Features of the working process of vortices of gas turbine power plants / A. G. Kirenchev, N. V. Danilenko // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering. 2018. No. 55. Pp. 23-32. (In Russian).

9. *Komov A. A.* Main regularities of damage to the compressor blades of aviation GTE by foreign objects / A. A. Komov, G. G. Belousov // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2008. No. 134. Pp. 25-34. (In Russian).

10. *Komov A. A.* The level of protection of aviation engines of domestic aircraft from damage by foreign objects / A. A. Komov, S. P. Yurin // Scientific Bulletin of GosNII GA. 2014. No. 4 (315). Pp. 42-48. (In Russian)

11. *Targ S. M.* Short course of theoretical mechanics: course-book for technical universities, 10th edition, revised and added. M.: Vyssh. shk., 1986. 416 p. (In Russian)

12. The manual on technical operation and repair of aviation equipment in civil aviation of Russia (in Russian)

13. *Zrelov V. A.* Domestic GTE. Basic parameters and design schemes (Part I): Textbook / Samar, State Aerospace University, Samara, 2002, 210 p. (In Russian)