DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.03

УДК 629.7.036.3

А.Г. Киренчев, Н.В. Даниленко

Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации, Иркутск, Россия

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИХРЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрены особенности рабочего процесса вихрей газотурбинных силовых установок, а также проблемы, порождаемые данным явлением. Произведен анализ проблем техногенного вихреобразования под воздухозаборниками газотурбинной силовой установки. Показан алгоритм математического расчета вихрей под воздухозаборниками газотурбинных двигателей с выводом результатов. Математическое моделирование было произведено методом дискретных вихрей. На основании полученных результатов математически доказана тенденция уменьшения их вихревой активности с переходом от интенсивного вихря к вихрям размытой интенсивности при малых значениях высоты воздухозаборника над подстилающей поверхностью. Представлена методика экспериментального исследования вихрей с использованием методов гидрогазоанalogии. Исследование было проведено на экспериментальной установке по исследованию вихревых течений, образующихся под влиянием силы Кориолиса. Результаты экспериментального исследования верифицировались с помощью математического расчета. На основании полученных результатов были определены вихревые характеристики исследуемых моделей воздухозаборников. По полученным характеристикам были определены новые особенности рабочего процесса вихрей газотурбинных силовых установок. Произведен поиск возможного практического применения полученным результатам, и предложены рекомендации по эксплуатации силовых установок воздушных судов на аэродроме с учетом выявленных особенностей.

Ключевые слова: вихри газотурбинных силовых установок, математическое моделирование, экспериментальное исследование, сила Кориолиса.

A.G. Kirenchev, N.V. Danilenko

Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russian Federation

SPECIAL FEATURES OF THE WORKING PROCESS OF THE VORTICES OF THE GAS-TURBINE POWER PLANTS

The article considers the special features of the working process of the vortices of gas-turbine power plants, and also problems generated by this phenomenon. The analysis of the technogenic vortex formation under the air inlets of gas-turbine power plant is produced. The algorithm of the mathematical calculation of vortices under the air inlets of gas turbine engines with the results is shown. Mathematical simulation was produced by the method of discrete vortices. The tendency of the decrease of their vortex intensity with the passage from the intensive vortex to the vortices of the washed away intensity at the low altitudes of the air inlets above the underlying surface is mathematically proven on the basis of the obtained results. The method of the experimental research of vortices with the use of methods of hydro-gas analogy is represented. The research was conducted on a experimental unit for the study of vortex flows influenced by Coriolis force. The results of an experimental research were verified by the mathematical calculation. On the basis of the obtained results were determined the vortex characteristics of the models of air inlets used by authors. The new special features of the working process of the vortices of gas-turbine power plants were determined according to the obtained characteristics. The search for possible practical application to the obtained results is produced and recommendations regarding the operation of the power plants of airships on the airfield taking into account the revealed special features are proposed.

Keywords: vortices of gas-turbine power plants, mathematical simulation, experimental research, Coriolis force.

Введение

Появление реактивных двигателей ознаменовало новый этап в развитии авиации, но при этом привело к образованию ряда новых проблем. Одной из главных являлось засасывание

посторонних предметов (пыли, камней, льда и прочего) в газозавоздушный тракт двигателя и, как следствие, повреждение его частей (лопаток компрессора и входного аппарата). При исследовании данного явления выяснили, что сила засасывания посторонних предметов усиливается с образованием под воздухозаборником (ВЗ) двигателя вихря (рис. 1). Но несмотря на актуальность данной проблемы, рабочий процесс (РП) вихреобразования (ВО) не изучен и по наши дни. И ныне специалисты, изучающие данное явление, не могут установить его физическую сущность. Наиболее близким аналогом данных вихрей являются атмосферные смерчи, рабочий процесс которых связывают с суточным вращением Земли. Но возможности современной науки не позволяют установить рабочий процесс отмеченных проблемных газодинамических явлений. Актуальна проблема исследования рабочего процесса вихрей газотурбинных силовых установок (ГТСУ) с учетом влияния внешних факторов (силы Кориолиса, интерференции с подстилающей поверхностью и другими частями ВС). Одной из главных задач исследования вихреобразования является установление вихревых характеристик – их следствий и областей применения. Для решения данной задачи следует провести анализ предыдущих работ по данной тематике с целью нахождения наиболее малоизученного внешнего фактора.

Рис. 1. Вихри ВЗ ГТСУ и их последствия [1]: а – вихрь стокового типа; б – помпаж ГТД; в – последствия засасывания ПП в ОК

Анализ работ по вихрям ГТСУ

Известно, что до настоящего времени установлен рабочий процесс интерференционных вихрей воздухозаборников, а также разработаны программы их математического моделирования на основе метода дискретных вихрей (МДВ) [1, 2]. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что наименее изученным математическим методом является эффект влияния силы Кориолиса на процесс образования вихрей под ВЗ ГТСУ.

Методика экспериментального исследования вихрей воздухозаборников двигателей воздушных судов (ВС) [3] использует базовые методы изучения отрывно-вихревых структур, а также их взаимодействия с различными элементами ВС, включая воздухозаборники. Данные методы исследования хорошо себя зарекомендовали и повсеместно используются для аэродинамических исследований элементов ВС [4, 5], но они не учитывают влияние на образование вихревых структур некоторых внешних факторов [6], например силы Кориолиса. Хотя влияние силы Кориолиса на процесс образования вихрей в атмосфере Земли описано во многих источниках [7–10], а с учетом того, что вихри под воздухозаборниками ЛА являются одной из разновидностей вихрей атмосферы Земли [11], силу Кориолиса следует учесть при их исследовании. Следовательно, рабочий процесс образования вихрей и засасывания ПП будет более полным, когда кроме учета интерференционного вихреобразования будет установлен рабочий процесс образования вихрей воздухозаборников в поле кориолисовой силы и его ускорения. Но не в од-

ном из указанных источников рабочий процесс вихреобразования не описан в полной мере, что является необходимым условием для полного исследования явления.

Исходя из вышесказанного следует провести комплексное исследование рабочего процесса вихрей ГТСУ с учетом влияния силы Кориолиса.

Математическое моделирование вихрей ГТСУ

Как уже указывалось ранее, математическое моделирование вихрей воздухозаборников обычно решается с использованием МДВ [1, 10, 12]. Интересующая нас задача математического моделирования стоковых вихрей посредством МДВ может быть упрощена с помощью замены стокового течения на входе в ВЗ функцией математического стока, интенсивность которого определяется по величине максимальной горизонтальной скорости $V_{г\max}$ у подстилающей поверхности, взятой из высотной вихревой характеристики серийных типовых ГТД. Эта же скорость может быть определена по замеру ее значения у подстилающей поверхности под моделью ВЗ в процессе ее испытания на различных режимах по секунднему массовому расходу воздуха.

Математическая постановка задачи численного моделирования стоковых вихрей у подстилающей поверхности в поле кориолисова ВО может быть представлена следующим образом (рис. 2). ВЗ располагаем вертикально для исключения влияния интерференционных сил на процесс формирования вихря.

Рис. 2. Вихревая модель кориолисовых вихрей

Поле потенциального стокового течения задается газодинамической функцией стока [1–3], размещенного над подстилающей поверхностью на высоте H , эквивалентной высоте воздухозаборника над поверхностью аэродрома:

$$c_{xyz} = \frac{\pm Q}{2\pi r_{xyz}}, \quad (1)$$

где c_{xyz} – проекции на оси координат местной скорости стокового потока в исследуемой точке; $\pm Q$ – интенсивность стока (источка); π – тригонометрическая константа, $\pi = 3,14\dots$; r_{xyz} – проекции радиус-вектора, соединяющего исследуемую точку с центром стока.

Подстилающая поверхность моделируется условием зеркального отображения исследуемого пространства с его стоком и потенциальным течением по признаку зеркального эффекта – равенства нулю во всех ее точках нормальной составляющей стоковой скорости потока $c_{ny=0} = 0$.

Использование газодинамической функции стока требует при постановке задачи математического моделирования его течения, выполнения граничного условия затухания индуцируе-

мой скорости на бесконечности. Это условие выполняется автоматически и заложено в его формуле (1). Действительно, при удалении исследуемой точки от стока на бесконечность ($r_{xyz} \rightarrow \infty$) возмущенная скорость c_{xyz} обращается в нуль.

За характерную скорость следует принимать упомянутую выше единственную из возможного множества горизонтальную составляющую скорости потенциального стокового потока на линии $c_{\tau \max}$. В такой постановке безразмерная скорость потока для выбранной скорости $c_{\tau \max}$ будет представлена характерным единичным вектором, используемым в задаче как характерная линейная скорость.

Характерный линейный размер представляется диаметром входа ($D_{вх}$) в модель воздухозаборника, которая заменена условным стоком интенсивности Q . Именно через его входное сечение обеспечивается забор рабочего тела из окружающей среды.

Эффект генератора кориолисова ВО в поле стокового течения моделируется отклоняющим действием кориолисовой силы $P_{кор}$, построенным на кориолисовом ускорении $a_{кор}$ для единичного интервала времени $\Delta t = 1$, взятом из формулы силы Кориолиса:

$$P_{кор} = ma_{кор} = m\Omega_3 R_3 u \sin \lambda.$$

Актуальна проблема выбора исследуемой зоны кориолисова ВО и модели вихрей, генерированных кориолисовой силой. Ее решение вытекает из эпюры распределения тангенциальной скорости стокового потока по подстилающей поверхности [1], а именно максимум этой скорости с двух сторон примыкает к линии $c_{\tau \max}$. Следовательно, можно выделить зону максимального влияния эффекта кориолисова отклонения стокового потока у подстилающей поверхности – места основной генерации одноименного ВО. При таком допущении справедлива вихревая модель кориолисова ВО, представленная на рис. 2. В качестве исключения бесконечной скорости в поле, примыкающем к стоку ($r \rightarrow 0$), вокруг него посредством радиуса $r_{ст}$ вводится сферическая зона ограничения скорости, реализуемая в виде равенства нулю ее модуля. Удовлетворение граничным условиям позволяет представить систему линейных алгебраических уравнений Гаусса [10] на базе неизвестных циркуляций Γ_i искомых стоковых кориолисовых вихрей с учетом интенсивности стока фактора времени. Решение указанной системы уравнений устанавливает искомые циркуляции кориолисовых вихрей и дает возможность перехода к очередной итерации.

Поставленная задача решается в нестационарной постановке [13] с последующим переходом от первой до заданной i -й итерации. На первом этапе вычисляются неизвестные циркуляции кориолисовых вихрей, замкнутых на подстилающую поверхность. Их свободные концы по линейному закону направлены в точку стока. После вычисления циркуляций проверяется граничное условие $c_{кор} = \text{const}$, т.е. скорость, создаваемая кориолисовой силой, во всех используемых контрольных точках должна быть постоянной. При удовлетворении этого условия производится расчет нового положения кориолисовых вихрей, определенных на первой итерации. Далее, используя полученные циркуляции, рассчитываем скорость потока с учетом эффекта Кориолиса по формуле

$$c_{xyz} = U_{н. xyz} + \sum_{i=1}^n \frac{\Gamma_i}{r_{ixyz}} + \sum_{j=1}^{it} \frac{\Gamma_{сб j}}{r_{ixyz}},$$

где $U_{н. xyz}$ – скорость набегающего потока (если задана); $\sum_{i=1}^n \frac{\Gamma_i}{r_{ixyz}}$ – скорость от циркуляций

вихрей, не сошедших в поток; $\sum_{j=1}^{it} \frac{\Gamma_{сб j}}{r_{ixyz}}$ – скорость от циркуляций всех вихрей, сошедших в поток.

Дальнейшее решение задачи сводится к повторному расчету циркуляций кориолисовых вихрей с учетом нормальной скорости как суммы скоростей, индуцируемых силой Кориолиса и свободными вихрями, сошедшими в поток. После завершения расчета заданного количества итераций и формирования массивов данных распределения скоростей в плоскости исследования происходит графическое построение линий тока под воздухозаборником (стоком). Если провести несколько расчетов и последующих графических построений с постепенным уменьшением высоты воздухозаборника над экраном, то можно наблюдать картину развития (формирования) установившегося вихревого шнура под воздухозаборником (рис. 3) в плоскости ZOX .

Рис. 3. Развитие вихревой трубки в исследуемом поле с увеличением высоты расположения ВЗ:
а, д – 5 диаметров ВЗ; б, е – 3 диаметра ВЗ; в, ж – 2 диаметра ВЗ; г, з – 1 диаметр ВЗ

На рис. 3 видно, что с уменьшением высоты расположения ВЗ (стока) происходит формирование вихревой трубки и увеличение суммарной циркуляции за счет увеличения тангенциальной скорости потока. Из векторного поля скоростей видно, что формирование вихревого шнура с застойной зоной в точке мнимого стока начинается с высоты трех диаметров ВЗ, а на двух приобретает ярко выраженный характер. За счет увеличения величины циркуляции каждого свободного вихря они начинают отталкивать друг друга, образуя застойную зону в точке мнимого стока. И чем ниже высота, тем больше будет величина застойной зоны. А поскольку количество свободных вихрей неизменно, суммарная плотность циркуляции за счет увеличения радиуса застойной зоны будет падать, что, в свою очередь, приведет к формированию вихревой пелены и хоровода мелких вихрей вместо одного крупного вихревого шнура. Несмотря на то, что по отдельности данные вихри и будут обладать большей циркуляцией, но из-за низкой плотности они не способны поднять в воздух объекты, способные причинить серьезный ущерб конструкции ВЗ. Этим эффектом и руководствуются конструкторы при создании современных самолетов с низко расположенными двигателями.

Экспериментальное исследование вихрей ГТСУ

Экспериментальные исследования вихреобразования с учетом силы Кориолиса уже проводились авторами статьи в работе [14]. По этой причине в данной статье не будет описываться подробный разбор устройства установки для исследования вихрей силы Кориолиса (рис. 4), а также методология проведения визуализации течений под воздухозаборниками ВС. Ссылаясь на результаты предыдущей работы, отметим, что на представленной установке возможно адекватное моделирование вихрей при соблюдении определенных условий проведения эксперимента. Также отметим, что при исключении влияния интерференционных сил характер линий тока

изменяется незначительно. Следовательно, проведение эксперимента с вертикально расположенным воздухозаборником не искажает характер течения вихревых структур, вызванных силой Кориолиса.

Рис. 4. Схема установки: 1 – турбовоздуходувка с электродвигателем, 2 – воздуховод, 3 – воздухозаборник, 4 – экран, 5 – поворотная часть, 6 – линия измерения тангенциальной скорости

Для замера скоростей использовался анемометр с крыльчаткой Testo 416 (рис. 5, а). Экспериментальный замер скорости c_t (см. рис. 5) в исследуемых точках производился по линии OA (см. рис. 4) с помощью анемометра при циклонической (вызванной силой Кориолиса) и антициклонической закрутках вихря. При антициклоническом вихреобразовании закрутка потока производилась принудительно с помощью вентиляторов (см. рис. 5, б). После получения антициклонической закрутки перед началом замеров вентиляторы убирались. Результаты замеров сводились в таблицу.

Рис. 5. Замер тангенциальной скорости: а – циклоническая закрутка вихря; б – антициклоническая

Для качества эксперимента проводим замеры по выборкам – каждый замер проводился 25 раз (количество выборок выбрано опытным путем из расчета сходимости коэффициента Стьюдента). Усредненные результаты эксперимента с учетом погрешности оформлялись протоколом в виде таблицы.

Результаты измерения тангенциальной скорости при циклонической (цикл.)
и антициклонической (антицикл.) закрутках вихря

$L, \text{ м}$	$H = 0,5d$		$H = d$		$H = 1,5d$		$H = 2d$	
	цикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	антицикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	цикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	антицикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	цикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	антицикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	цикл. $c_\tau, \text{ м/с}$	антицикл. $c_\tau, \text{ м/с}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,025	17	15	4,5	4	1,8	1,6	0,8	0,7
0,05	13,4	12	5,3	4,7	2,1	1,8	0,9	0,8
0,08	8,4	5,7	4,4	3,9	2,2	1,9	1	0,9
0,1	5,8	2,7	2,6	2,3	1,6	1,4	1,1	1
0,13	2,2	1,4	1,4	1,2	1,2	1	0,8	0,7
0,15	1,3	1,1	1,1	1	0,9	1,8	0,6	0,6
0,18	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	–	–
0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	–	–

Прежде чем делать выводы, необходимо проверить корректность полученных данных. Для этого по величине максимальной тангенциальной скорости $c_{\tau \max}$ находим интенсивность эквивалентного стока $Q_{\text{экв}}$, генерирующего в точке x максимальную тангенциальную скорость $c_{\tau \max}$:

$$c_{\tau \max} = \frac{Q_{\text{экв}}}{2\pi r}, \text{ отсюда } Q_{\text{экв}} = c_{\tau \max} 2\pi r, \quad (2)$$

где r – радиус-вектор от исследуемой точки до точки мнимого стока.

По данным таблицы находим максимальные тангенциальные скорости $c_{\tau \max}$ для каждого значения высоты h , подставив их в уравнение (2), находим интенсивности эквивалентного стока для четырех значений высоты H расположения ВЗ над экраном. Полученные реальные значения интенсивности стока позволяют построить графики распределения тангенциальных скоростей на поверхности экрана под ВЗ при заданных значениях высоты H . Для этого в граничные условия задачи математического моделирования вводим необходимую высоту расположения воздухозаборника и соответствующую ей интенсивность стока и по этим данным проводим программный расчет. По полученным значениям тангенциальных скоростей строим вихревые характеристики, используя программу Excel. Сопоставим результаты математического расчета скорости стокового потока с результатами эксперимента (рис. 6). Находим, что сходимость полученных результатов эксперимента с расчетными данными находится в пределах нормы.

Рис. 6. Расчетные характеристики тангенциальной скорости при вычисленных значениях Q

Таким образом, предлагаемая методика экспериментального исследования стокового течения под ВЗ, вертикально ориентированным над подстилающей поверхностью, позволяет получать корректные результаты тангенциальной скорости стокового потока у подстилающей поверхности.

Далее строим графики распределения скоростей на поверхности экрана под ВЗ при заданных закрутках вихря (рис. 7) – циклонической и антициклонической, чтобы определить величину влияния силы Кориолиса на скорость потока под воздухозаборником ГТСУ. Для наглядности строим графики на высоте ВЗ, эквивалентной 0,5 его диаметра ($H = 0,5d$), так как на этой высоте мы имеем наибольшую скорость.

Рис. 7. Характеристики тангенциальной скорости при циклонической и антициклонической закрутках вихря: —●— циклоническая; —■— антициклоническая

Из рис. 7 видно, что сила Кориолиса влияет на тангенциальную скорость потока, увеличивая ее на 10–15 % (11,76 % по максимальной скорости), если закрутка вихря циклоническая, что подтверждает ее влияние на интенсивность циркуляции вихря.

Заключение

В данной статье была выявлена одна новая особенность рабочего процесса вихрей ГТСУ и математически обоснована тенденция к использованию двигателей, низко расположенных над поверхностью аэродрома (менее одного эквивалентного диаметра ВЗ). Новая же особенность заключается в том, что за счет действия силы Кориолиса прирост тангенциальной скорости потока под воздухозаборником может составлять 11,76 % на 52-й географической широте. Если учесть изменение величины силы Кориолиса в зависимости от широты (от 0 на экваторе до максимума на полюсе), то можно сделать вывод, что прирост тангенциальной скорости также будет меняться по широтам (от 0 до 15 %).

Рис. 8. Величина зон опасности ГТД

Известно, что двигатели ВС (рис. 8) имеют так называемые зоны опасности [15] при их работе на аэродроме. Величина этой зоны напрямую зависит от скорости потока под воздухозаборником ГТСУ, а она, в свою очередь, может изменяться в зависимости от того, на какой широте работает ГТД. Следовательно, можно сделать вывод, что зоны опасности ГТД могут меняться в зависимости от расположения аэродрома базирования ВС.

Следовательно, результаты, полученные в данной статье, могут иметь практическое применение при уточнении размеров зон опасности ГТД с учетом влияния силы Кориолиса, но только после проведения дополнительных исследований вихреобразования моделей воздухозаборников эталонных ГТД

Библиографический список

1. Теория вихрей перед воздухозаборниками самолетов при работе газотурбинных двигателей на аэродроме: монография / Н.В. Даниленко, П.М. Кривель, С.В. Пахомов, А.М. Сафарбаков, М.М. Федотов / ИрГТУ. – 2-е изд., доп. – Иркутск, 2011. – 348 с.
2. Численное моделирование течения на входе в сверхзвуковой воздухозаборник внешнего сжатия при энергоподводе в набегающий сверхзвуковой поток / С.Ю. Пирогов, А.С. Юрьев, В.В. Типаев, А.С. Махров // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16, № 3. – С. 154–159.
3. Салтыков А.С., Федотов М.М. Экспериментальные исследования процесса вихреобразования под входным устройством самолета с использованием вихревых характеристик воздухозаборника // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 3(39). – С. 72–76.
4. Исследования МАИ в области отрывных и струйных течений вблизи элементов ЛА и их полных компоновок / Л.Г. Артамонова, А.Н. Радциг, Ю.А. Рыжов, Н.В. Семенчиков, Е.Л. Тархов, Г.Ф. Чернов, О.В. Яковлевский // Вестник Московского авиационного института. – 2005. – Т. 12, № 2. – С. 31–48.
5. Управление взаимодействием пространственных отрывно-вихревых структур с несущими элементами самолета / С.Б. Свищевский, Л.Г. Артамонова, А.Н. Радциг, Н.В. Семенчиков // Вестник Московского авиационного института. – 2002. – Т. 9, № 1. – С. 3–24.
6. Zhang X., Showman A.P. Atmospheric circulation of brown dwarfs: jets, vortices, and time variability // The Astrophysical J. Lett. – 2014. – Vol. 788, no. 1. – P. L6.
7. The online tornado FAQ. – URL: <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/> (accessed 1 November 2018).
8. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука, 2008. – 80 с.
9. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты / С.П. Баутин, И.Ю. Крутова, А.Г. Обухов, К.В. Баутин. – Новосибирск: Наука, 2013. – 216 с.
10. Баутин С.П., Обухов А.Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. – Новосибирск: Наука, 2012. – 152 с.
11. Даниленко Н.В. Прецессия изолированного циклонического вихря в поле вращения Земли // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 2(34). – С. 20–23.
12. Маленев А.И. Математическая модель на базе метода дискретных вихрей // Аспирант. – 2016. – № 3(19). – С. 55–57.
13. Самолысов А.В., Масевич А.В., Вальес Н.Г. Расчет вихревого обтекания неподвижных и колеблющихся цилиндрических тел методом дискретных вихрей // Вестник научно-технического развития. – 2014. – № 6(82). – С. 31–37.
14. Даниленко Н.В., Киренчев А.Г. Конвертация вихря при изменении высоты расположения воздухозаборника над подстилающей поверхностью [Электронный ресурс] // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык: междунар. информ.-аналит. журн. / Иркут. филиал МГТУ ГА. – Иркутск, 2017. – № 2. – URL: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/2017-2> (accessed 1 November 2018).
15. Aircraft engine spirals & swirls. – URL: <https://aerosavvy.com/aircraft-engine-spirals/> (accessed 1 November 2018).

References

1. Danilenko N.V., Krivel P.M., Pakhomov S.V., Safarbakov A.M., Fedotov M.M. Teoriya vikhrey pered vozdukhozabornikami samolëtov pri rabote gazoturbinnnykh dvigateley na aerodrome [The theory of vortices before air inlets of airplanes with the gas-turbine engines working on the airfield]. Irkutsk: Irkutsk national research technical university, 2011, 348 p.
2. Pirogov S.Yu., Yurev A.S., Tipaev V.V., Makhrov A.S. Chislennoe modelirovanie techeniya na vkhode v sverkhzvukovoi vozdukhozabornik vneshnego szhatiya pri energopodvode v nabegayushchii sverkhzvukovoi potok [Numerical simulation of flow at the inlet of the supersonic air intake of the external compression when power supply added in supersonic oncoming stream]. Moscow: Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 154-159.

3. Saltykov A.S., Fedotov M.M. Eksperimental'nye issledovaniya processa vihreobrazovaniya pod vhodnym ustroystvom samoleta s ispol'zovaniem vihrevykh karakteristik vozduhozabornika [Experimental studies of the process of vortex formation in front of the aircraft input device with the use of eddy characteristics of the inlet]. Irkutsk: Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, vol. 3 (39), pp. 72-76.
4. Artamonova L.G., Radtsig A.N., Ryzhov Yu.A., Semenchikov N.V., Tarkhov E.L., Chernov G.F., Yakovlevskii O.V. Issledovaniya MAI v oblasti otryvnykh i struinykh techenii vblizi elementov LA i ikh polnykh komponovok [Study of the MAI in the field of vortices and jet streams in the vicinity of elements of the aircraft and their full-size layouts]. Moscow: Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 31-48.
5. Svirshchevskiy S.B., Artamonova L.G., Radtsig A.N., Semenchikov N.V. Upravleniye vzaimod-eystviyem prostranstvennykh otryvno-vihrevykh struktur s nesushchimi elementami samoleta [Management of the interaction of spatial detached vortex structures with the lifting elements of aircraft] Moscow: Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 3-24.
6. Zhang X., Showman A.P. Atmospheric circulation of brown dwarfs: jets, vortices, and time variability. The Astrophysical Journal Letters, 2014, vol. 788, no. 1, P. L6.
7. The online tornado FAQ. URL: <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/> (1st November, 2018).
8. Bautin S.P. Tornado i sila Koriolisa [Tornado and Coriolis force]. Novosibirsk: Nauka, 2008, 80 p.
9. Bautin S.P., Krutova I.YU., Obukhov A.G., Bautin K.V. Razrushitelnyye atmosferynye vikhri: teoremy, raschety, eksperimenty [The destructive atmospheric vortices: the theorems, calculations, the experiments]. Novosibirsk: Nauka, 2013, 216 p.
10. Bautin S.P., Obukhov A.G. Matematicheskoe modelirovaniye razrushitelnykh atmosferynykh vikhrei [Mathematical modeling of the destructive atmospheric vortices]. Novosibirsk: Nauka, 2012, 152 p.
11. Danilenko N.V. Pretsessiya izolirovannogo tsiklonicheskogo vikhrya v pole vrashcheniya Zemli [Precession of cyclonic isolated vortex in the rotation field of the Earth] 2008, no. 2 (34), pp. 20-23.
12. Malenev A.I. Matematicheskaya model na baze metoda diskretnykh vikhrei [Mathematic model based on method of discrete vortices]. *Aspirant*, 2016, no. 3(19), pp. 55-57.
13. Samolysov A.V., Masevich A.V., Valyes N.G. Raschet vikhrevogo obtekaniya nepodviznykh i koleblyushchikhsya tsilindricheskikh tel metodom diskretnykh vikhrey [Calculation of vortex flow of the motionless and fluctuating cylindrical bodies with method of discrete vortices]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2014, no. 6(82), pp. 31-37.
14. Danilenko N.V., Kirenchev A.G. Konvertatsiya vikhrya pri izmenenii vysoty raspolozheniya vozdukh-zabornika nad podstilayushchey poverkhnostyu [Vortex conversion with varying height of an air intake above the underlying terrain]. *Crede Experto: transport, society, education, language*. Irkutsk, 2017, no. 2. URL: <http://ce.if-mstuca.ru/index.php/2017-2> (accessed 1 November 2018).
15. Aircraft Engine Spirals & Swirls. URL: <https://aerosavvy.com/aircraft-engine-spirals/> (1st November, 2018).

Об авторах

Киренчев Антон Геннадьевич (Иркутск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Летательные аппараты и двигатели», Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации (664009, г. Иркутск, ул. Советская, д. 139, e-mail: antonkirenchev25@mail.ru).

Даниленко Николай Владимирович (Иркутск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты и двигатели», Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации (664009, г. Иркутск, ул. Советская, д. 139, e-mail: danko_irk@mail.ru).

About the authors

Anton G. Kirenchev (Irkutsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Aircraft and Engines, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation (139, Sovetskay st., Irkutsk, 664009, Russian Federation, e-mail: antonkirenchev25@mail.ru).

Nikolay V. Danilenko (Irkutsk, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aircraft and Engines, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation (139, Sovetskay st., Irkutsk, 664009, Russian Federation, e-mail: danko_irk@mail.ru).