УДК 551.515.3
DOI 10.51955/2312-1327_2024_4_67

ТЕОРЕМА О ПОГОННОЙ ПЛОТНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВИХРЕВОЙ ТРУБКИ

Николай Владимирович Даниленко,
orcid.org/0000-0002-9599-7573,
кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический университет гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, д. 3
Иркутск, 664047, Россия
danko_irk@mail.ru

Антон Геннадьевич Киренчев,
orcid.org/0000-0002-6023-4496,
кандидат технических наук
Московский государственный технический университет гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, д. 3
Иркутск, 664047, Россия
antonkirenchev25@mail.ru

Аннотация. В статье дано описание явления вихреобразования в атмосферной среде, а также проведен анализ исследований по данной теме. Выявлены основные противоречия и проблемы в исследовании вихреобразования. Рассмотрен рабочий процесс преобразования исходного потенциального течения рабочего тела исследуемой среды в течение вихревое с описанием основных факторов, влияющих на данный процесс. Выявлены противоречия в процессе формирования вихревой трубки, для решения которых был выбран новый объект исследования – удельная погонная плотность циркуляции вихрей газовых (жидких) естественных и техногенных сред. Дана оценка состояния и проблем удельной погонной плотности циркуляции вихрей исследуемого вихреобразования. Представлено определение удельной погонной плотности циркуляции на основе ее рабочего процесса. Установлена взаимосвязь погонной плотности циркуляции с тангенциальной скоростью среды на внешней поверхности вихревой трубки. Дано определение теоремы о погонной плотности циркуляции вихревой трубки. Приведено доказательство теоремы и математическая взаимосвязь погонной плотности циркуляции вихревой трубки среды с тангенциальной скоростью на её внешней поверхности. Представлены следствия теоремы и области их применения.

Ключевые слова: вихреобразование, факторы генерации, рабочий процесс, определение, теорема, классификация, погонная плотность циркуляции, вихревая трубка, вихри воздухозаборников авиационных двигателей, смерчи.

© Н.В.Даниленко, А.Г.Киренчев, 2024

LINEAR DENSITY THEOREM FOR CIRCULATION IN A VORTEX TUBE

Nikolay V. Danilenko,
orcid.org/0000-0002-9599-7573,
Candidate of Technical Sciences, associate professor
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov St.
Irkutsk, 664047, Russia
danko_irk@mail.ru

Anton G. Kirenchev,
orcid.org/0000-0002-6023-4496,
Candidate of Technical Sciences
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov St.
Irkutsk, 664047, Russia
antonkirenchev25@mail.ru

Abstract. The article describes vortex formation in the atmospheric medium and analyzes the research on this topic. The main contradictions and problems in the study of vortex formation are revealed. The working process of transforming the initial potential flow of working body of the medium under study into vortex flow with the description of the main factors influencing this process is considered. The contradictions in the process of vortex tube formation are revealed, for which a new object of research was chosen - specific linear density of vortex circulation of gas (liquid) natural and anthropogenic media. The state and problems of the specific linear density of vortex circulation of the investigated vortex formation are assessed. The definition of specific linear density of circulation on the basis of its working process is presented. The correlation between the linear circulation density and the tangential velocity of the medium on the outer surface of the vortex tube is established. The definition of the theorem on the linear circulation density of a vortex tube is given. The proof of the theorem and the mathematical relationship of the linear density of medium vortex tube circulation and the tangential velocity on its outer surface are given. Corollaries of the theorem and their applications are presented.

Keywords: vortex formation, generation factors, working process, definition, theorem, classification, linear density of circulation, vortex tube, aircraft engine air intake vortices, tornadoes.

Введение

Исследования вихревой активности естественной атмосферной среды, а также вихреобразования техногенных сред, их газодинамических вихревых особенностей (вихрей и вихревых трубок) и иных видов вихревой активности, включая ярко выраженные «хоботом» и вертикально ориентированные цилиндрические вихри, позволили установить ряд проблем и противоречий, не решённых современной аэродинамической и метеорологической науками.

К противоречиям вихрей относят:

– определения, построенные по сущности рабочего процесса (РП) вихревого продукта и его вихревой активности, для:

1) вихрей (рис. 1 а) и их вихревых шнуров;

2) вихревых трубок умеренных размеров (рис. 1 б);

3) смерчей (торнадо в США) и водоворотов (рис. 1 а, б);

4) циклонических вихревых образований, представляемых циклонами средних широт и тайфунами тропических акваторий полушарий Земли;

5) техногенных вихрей стокового типа (рис. 1 в), замкнутых на подстилающую поверхность;

6) техногенных вихрей иной природы (дифференциальных вихрей, вихревых колец реактивных сопл и др.);

– определение погонной плотности циркуляции γ, как характерного параметра вихревой активности исследуемой среды;

– рабочий процесс вихревой трубки, как газодинамической вихревой особенности (вихревого тела), в силу многоликости их рабочего процесса;

– погонная плотность циркуляции и её связь с кинематическими параметрами газовой (жидкой) среды на внешней поверхности вихревой трубки;

– характеристики и следствия погонной плотности циркуляции и др.

Рисунок 1– Вихри у подстилающей поверхности: а – смерч с признаком вихревой трубки, *Источник: https:// klike.net/uploads/posts/2023-03/1679976725_3-57.jpg*; б – торнадо с активной вихревой трубкой, *Источник: https://stihi.ru/pics/ 2021/05/19/ 4292.jpg*; в – техногенный вихрь стокового типа перед работающим ГТД на земле, *Источник: https://i.pinimg.com/originals/10/bd/3a/10bd3a3f62027ca5bbcd403d8ada41f1.jpg*

Полноценное исследование вихрей и связанных с ними явлений невозможно без решения вышеперечисленных противоречий, что в свою очередь требует определиться с методами нахождения решений на основе анализа имеющегося материала по данной теме.

Материалы и методы, используемые для разрешения противоречий вихрей

Исследование вихреобразования невозможно без понимания основ теории вихрей, которые были сформированы ранее другими учёными, работающими над изучением данной проблемы.

Пионером в познании физической сущности и рабочего процесса естественного вихреобразования и его вихрей (торнадо) стал метеоролог США

Эспи Д. П. Им предложена теория бурь, в основу которой была заложена циклоническая активность атмосферы Земли. Его теория циклонического характера вихревых бурь была одобрена учёными США, Франции и Англии. Но в силу существования на территории США торнадо и циклонов как циклонического, так и не опознанного антициклонического направления вращения, она не получила своего развития. Труды Эспи Д. П. потеряли свою актуальность и ныне не востребованы [Espie, 1841].

Среди отечественных учёных активным исследователем смерчей и торнадо стал академик Наливкин Д. В. [Наливкин, 1969]. Его монография «Ураганы, бури и смерчи», изданная в 1969 году, стала настольной книгой многих исследователей этого загадочного явления. Познание сущности смерчей было продолжено Наливкиным В. Д. в монографии «Смерчи», опубликованной в 1984 году [Наливкин, 1984].

Наличие указанных монографий о смерчах послужило основанием для продолжения начатого научного направления другими российскими учёными и установления его рабочего процесса. Первый шаг в установлении сущности рабочего процесса смерча был сделан учёным-атомщиком Кушиным В. В. [Кушин, 1993]. А именно, он теоретически установил источник энергии смерча в виде возвращаемой скрытой теплоты парообразования.

Базовые основы теории образования смерчей и циклонов известны с момента открытия Ломоносовым М. В. законов сохранения энергии и массы физического вещества, в последующем перешедших в законы термодинамики, теорию движения газа (жидкости). На их основе появились паровой двигатель Ползунова, поршневые тепловые двигатели, воздушно-реактивные и ракетные двигатели и их носители, генерирующие заметное разнообразие техногенных вихрей. Основы этих вихрей заложены в термодинамике [Нечаев и др., 2005] и аэродинамике [Лойцянский, 1970; Ништ, 1994] а также в др. источниках. Например, в основу рабочего процесса и цикла тепловой машины заложено уравнение Майера «$p \cdot v = R \cdot T$» – работа расширения газа в поле подведенной теплоты. А вихри – работа газа на разрыве тангенциальной скорости и (или) силового и теплового воздействия на внешнюю среду, определяемые критерием угловой скорости ($\omega \neq 0$).

Свойства вихрей внешней среды, доступные к их исследованиям, могут быть расширены теоретической механикой [Тарг, 1974], учитывая, что официальная наука признает вихри газовыми телами, обладающими поверхностью, массой, упругостью, избыточным давлением и другими свойствами. Стоит отметить, что исследования явления вихреобразования активно проводятся и в наши дни как с целью изучения техногенных вихрей воздухозаборников ГТД и методов борьбы с ними [Киренчев и др., 2022; Комов, 2020], так и с целью познания рабочего процесса вихреобразования и создания адекватных математических моделей для исследования данного процесса [Быстрай и др., 2012; Даниленко и др., 2018].

Основываясь на опыте ранних исследований, можно судить о том, что разрешение совокупности противоречий напряжения вихревой трубки Г с её

погонной плотностью циркуляции $\gamma_{в.т}$ требует ряда определений и исследований вихрей. Воспользуемся известными из аэродинамики определениями вихревой трубки (ВТ) с её газодинамическими, кинематическими и геометрическими параметрами.

Вихревая линия – совокупность последовательно расположенных бесконечно малых вихревых отрезков (точек), в каждом (ой) из которых в данный момент времени вектор её угловой скорости вращения частиц среды ($\bar{\omega} \neq 0$) направлен по касательной к ним [Ништ, 1994].

Вихревая трубка – радиально замкнутая на себя поверхность, образованная последовательно расположенными по исследуемому контуру продольными вихревыми линиям [там же].

Вихревой шнур (вихрь) – газ или жидкость, заключённые внутри вихревой трубки [там же].

Определение смерча и торнадо не однозначно и окончательно не установлено [Даниленко и др., 2018].

Торнадо (смерч) – атмосферный вихрь, возникающий в кучево-дождевом (грозовом) облаке и распространяющийся вниз, часто до самой поверхности земли, в виде облачного рукава или хобота диаметром в десятки и сотни метров [там же].

Как видим, определение торнадо и смерча противоречивы и не содержат опоры на основные уравнения (1) движения газа [Котовский, 2015; Нечаев и др., 2005]:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} \pm L_{вн} \pm Q_{вн} = i_2 + \frac{c_2^2}{2}, \frac{Дж}{кг}. \qquad (1)$$

Следовательно, необходимо дать новое определение, основанное на сущности рабочего процесса вихреобразования, для чего необходимо описать особенности последнего.

Дискуссия о сущности рабочего процесса вихреобразования и необходимости введения теоремы погонной плотности циркуляции вихревой трубки

По мнению авторов настоящей статьи, РП преобразования исходного потенциального течения рабочего тела исследуемой среды в течение вихревое (торнадо и др.) должен содержать факторы энергообмена с внешней средой посредством:

– энергообмена ресурсом термодинамических параметров в виде внешней механической работы $L_{вн} \neq 0$ и внешней теплоты $Q_{вн} \neq 0$;

– использования запаса внутренней энергии ($\Delta i \neq 0$);

– пополнения запасом внешней энергии ($\Delta(r^2\omega^2{}_2 / 2)_{вн} \neq 0$) от вращения рабочего тела;

– энергии градиентного разрыва тангенциальной скорости ($dc / dl \neq 0$) на границе существующих поверхностей раздела сред (потоков);

– энергии притока внешней вихревой активности ($\Delta\omega^2{}_{вн} / 2 \neq 0$).

Эти факты частично отображены в определении *смерч-вихря*, например, локальным притоком солнечной энергии [Даниленко и др., 2018].

Следует отметить, что определения торнадо и вихреобразования по сущности РП с использованием внешнего энергообмена посредством газодинамической работы отклоняющего действия силы Кориолиса $L_{кор} > 0$ и теплообмена в виде скрытой теплоты парообразования $Q_{п.о} > 0$ уже известны [Даниленко, 2004; Кушин, 1993; Наливкин, 1984]. Действительно, в основу рабочего процесса стокового вихреобразования торнадо у земли положена работа $L_{кор}$ интерференционной силы Кориолиса в поле суточного вращения Земли с реализацией возврата скрытой теплоты парообразования на этапах фазового перехода пара в воду и воды в лёд в рабочей полости материнского облака с превращением последнего в вихредиполь со стоком от подстилающей поверхности земли. Этот РП не противоречит основным законам термодинамики [Котовский, 2015] и рабочему процессу торнадо.

Рабочий процесс включает:

1) подогрев подстилающей поверхности земли (воды) притоком солнечной радиации на фазе максимума её активности (примерно с 12^{00} до 16^{00});

2) активный подогрев поверхностного слоя земли и влаги, в ней содержащейся;

3) испарение влаги и её переход в свободное состояние;

4) работа подъёмной силы Архимеда по всплытию свободно подогретого пара на высоту равновесного положения;

5) инверсия пара с выделением скрытой теплоты парообразования на этапе перехода пара в микрокапли воды (туман) и воды в микрокристаллы льда (град) на стадии формирования материнского облака, переходящего в режим тепловой газодинамической «*машины*» типа термика с выбросом лёгкой среды на более высокий уровень и освобождением рабочего объёма внутри облака для забора новых порций влажного воздуха;

6) стоковый забор новых порций свободно всплывающей к рабочей части материнского облака влажной среды со стороны подстилающей поверхности земли в поле действия силы и работы Архимеда;

7) генерация у подстилающей поверхности (земли, аэродрома, водной акватории) вихревой активности стокового потенциального потока, наведённой суточным вращением Земли посредством отклоняющего действия (работы по окружности) силы Кориолиса с формированием моментного вихревого поля, как носителя вихревой активности будущего торнадо;

8) формирование улитки вихревой трубки гиперболического типа с поджатием потока по мере его приближения к стоковому входу в рабочую часть материнского облака и с формированием инверсионно видимой вихревой трубки;

9) накопление и аккумуляция циркуляции I вихревой трубки [Ништ, 1994] с последующим переходом материнского облака в тепловой вихредиполь циклонического направления вращения с забором всплывшего влажного воздуха от подстилающей поверхности земли в полость материнского облака;

10) формирование вихревой активности влажного стокового потока воздуха у экрана (подстилающей поверхности земли) работой отклоняющего

действия силы Кориолиса путём перехода потенциального течения в течение вихревое по направлению восходящих спиралей Архимеда;

11) ускорение вихревого стокового потока в рабочую полость материнского облака с поджатием его внешней поверхности до состояния активного вихревого жгута, ограниченного вихревой трубкой, замыкающейся по следствию теоремы Гельмгольца на подстилающую поверхность (экран) [Ништ, 1994].

Появление в поле восходящего стокового течения над влажной и подогретой солнечной радиацией поверхностью экрана вихревой трубки (см. рис. 1) требует установления её свойств. В некоторой степени они очевидны, но и противоречивы. Вихревая трубка формируется по известному её определению (см. выше). Она определена замкнутым контуром с множеством плотно примыкающих друг к другу вихревых нитей. Поверхность вихревой трубки построена на балансе сил избыточного внешнего давления и внутреннего разрежения и центробежной силы. Внутри ВТ расположена полость разрежения, которой она замыкается на подстилающую поверхность. На поверхности ВТ реализуется условие непротекания. Следовательно, абсолютная скорость потока «*c*» ориентирована тангенциально, т. е. нормальная составляющая этой скорости равна нулю ($c_{\text{п}} = 0$). Но в силу газодинамически образованной конструкции вихревой трубки, количество вихрей, её образующих, должно быть больше трёх, исходно образующих внутреннюю не герметичную полость. Очевидно, существует критическая погонная плотность циркуляции γ вихревых нитей по контуру вихревой трубки с их напряжением $\Gamma_i \neq 0$, при котором осуществляется замкнутость её поверхности, т. е. реализуется граничное условие непротекания $c_{\text{п}} = 0$. Оно придаёт вихревой трубке форму пока не признанного официальной наукой «*газового*» тела. Такие тела откроют возможность применять к ним законы теоретической механики и теории механизмов и машин. Именно при таком подходе «тело» циклона при его интерференции с Землёй приобретает западный перенос, пока не имеющий определения по сущности рабочего процесса. Тогда также можно утверждать, что Солнце биполярно. В нём существуют тела встречной и противоположной циркуляции с их полюсами, дающими цикличную их смену полярности Солнца.

Появившееся противоречие ВТ смерча (торнадо) требует введения определения погонной плотности γ циркуляции I (напряжения Г) и её зависимости от кинематических и геометрических параметров на внешней поверхности вихревой трубки.

Погонная плотность циркуляции вихревой трубки $\gamma_{\text{в. т}}$ – отношение циркуляции Г её вихревого шнура к длине $l_{\text{п в. т}}$ нормального сечения замкнутого его контура.

По определению погонной плотности циркуляции вихревой трубки имеем его математическое выражение:

$$\gamma_{\text{в. т}} = \frac{\Gamma_{\text{в. т}}}{l_{\text{п. в. т}}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \qquad (2)$$

Следствия определения погонной плотности циркуляции:

– погонная плотность циркуляции является размерным параметром;

– при постоянном значении циркуляции Г = I погонная плотность циркуляции имеет гиперболическую зависимость $\gamma_{\text{в.т}} = f(\text{const}/\, l_{\text{п в.п.}})$;

– модель циркуляции Г по круговому контуру вихревой трубки получена методом дискретных вихрей [Белоцерковский и др., 1978] и в эксперименте представлена на рисунке 2.

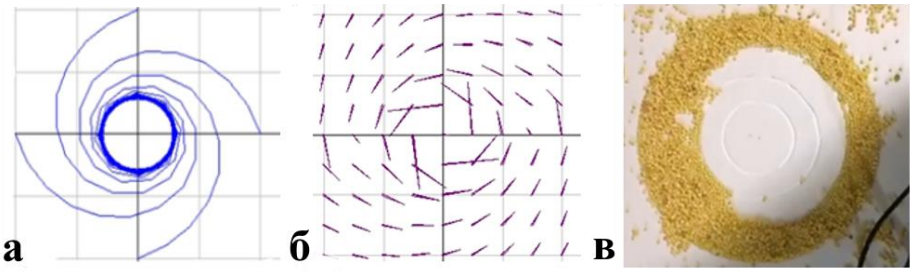

Рисунок 2 – Модели кинематического поля вихревой трубки:
а – по линиям тока; б – по полю скоростей; в – по результатам эксперимента

Эксперимент качественно подтверждает результаты расчёта вихревой трубки и поля скоростей.

Результаты – теорема погонной плотности циркуляции вихревой трубки

Изложение определения теоремы и её доказательства требует введения допущений к рабочему телу и рабочему процессу вихреобразования и его активных вихрей с явно выраженной вихревой трубкой (см. рис. 1).

Допущения к рабочему телу и рабочему процессу вихреобразования:

1) рабочее тело, заменяющее воздух – идеальная несжимаемая и невязкая жидкость;

2) течение рабочего тела установившееся;

3) циркуляция I (напряжение Г) вихревой трубки по её длине согласно теореме Гельмгольца (I = Г = const) – постоянная;

4) вихревая трубка непротекаемая ($c_{\text{п}}$ = 0) и ограничена поверхностью земли и плоскостью основания материнского облака;

5) относительная длина $\bar{l}_{\text{в.т}} = l_{\text{в.т.}} / d_{\text{в.т.}}$ вихревой трубки значительно превышает её диаметр $d_{\text{в. т}}$. Следовательно, при расчёте погонной плотности циркуляции $\gamma_{\text{в. т}}$ можно применять закон Био-Савара для тангенциальной скорости c_{τ} бесконечно длинного вихря:

$$c_{\tau} = \frac{\Gamma_{\text{в.т}}}{2\,\pi \cdot r_{\text{п в.т}}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \qquad (3)$$

Здесь π и $r_{\text{п в. т}}$ – тригонометрическая константа и радиус нормального сечения вихревой трубки.

Определение теоремы будет следующим:

В безветренной сплошной среде при установившемся угловом вращении тела вихревой трубки погонная плотность её циркуляции $\gamma_{в.\ т}$, определяемая отношением напряжения $\Gamma_{в.т}$ вихревой трубки к длине $l_{п\ в.\ т,}$ контура циркуляции в нормальном сечении равна тангенциальной скорости внешнего потока c_τ на наружной границе вихревой трубки в исследуемом нормальном сечении.

Доказательство теоремы построим на типовом определении погонной плотности циркуляции, обозначаемой греческой буквой γ.

Погонная плотность циркуляции γ – доля циркуляции скорости Г, приходящая на единицу длины контура циркуляции l.

Исходные данные для доказательства:

– вихрь линейный, активный ($\Gamma \neq 0 = \text{const}$) в виде вихревой трубки (рис. 3);

– поверхность вихревой трубки – тонкостенная, цилиндрическая;

– напряжение вихря определено циркуляцией скорости Г, распределённой по контуру вихревой трубки;

– длина вихря – бесконечно длинная по продольной оси вращения;

– математическое обеспечение – закон Био-Савара, устанавливающий взаимосвязь циркуляции скорости Г с тангенциальной скоростью c_τ, индуцируемой вихрём на границе вихревой трубки и за её пределами;

$r_{в.\ т}$ – радиус вихревой трубки – удаление любой точки её стенки от продольной оси вращения;

l – длина контура циркуляции – условно ограниченной длины.

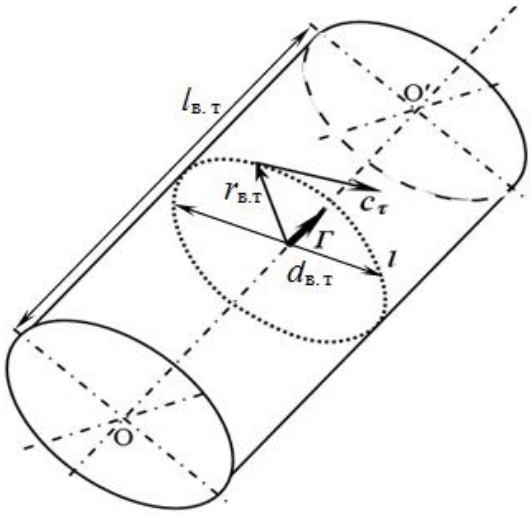

Рисунок 3 – Фрагмент исследуемой вихревой трубки

При постоянстве радиуса r вихревой трубки по длине полного контура её круга, определяемого известным выражением:

$$l = 2\pi r. \tag{4}$$

Тогда, по определению погонной плотности циркуляции γ находим:

$$\gamma = \frac{\Gamma}{l}. \tag{5}$$

Воспользуемся определением циркуляции скорости Г.

Циркуляции скорости Г – работа вектора тангенциальной скорости c_τ по круговому замкнутому контуру, представляемая формулой:

$$\Gamma = \oint_l c_\tau dl. \quad (6)$$

Тогда для кругового замкнутого контура циркуляция скорости Г примет вид:

$$\Gamma = 2c_\tau \pi r. \quad (7)$$

Сделав подстановку найденных величин в выражение погонной плотности циркуляции скорости, получим:

$$\gamma = \frac{\Gamma}{2\pi r} = \frac{c_\tau 2\pi r}{2\pi r} = c_\tau. \quad (8)$$

Следствия теоремы:

1. Погонная плотность циркуляции γ – скалярная величина, равная модулю тангенциальной скорости $|c_\tau|$ на поверхности вихревой трубки.

2. Рост погонной плотности циркуляции γ вихревой трубки снижает эффект проницаемости её поверхности и делает её непротекаемой, то есть упругой. На поверхности вихревой трубки сверхкритической плотности вектор нормальной скорости $c_n = 0$.

3. Уменьшение абсолютного значения погонной плотности циркуляции γ ниже критического значения сопровождается потерей её герметичности, заполнением полости низкого давления внешним потоком, увеличением диаметра вихревой трубки с переходом вихревого шнура в вихрь размытой интенсивности, что свойственно ныне вихрям воздухозаборников силовых установок воздушных судов, низко расположенных над землёй.

4. Критическое значение погонной плотности циркуляции следует определить, используя методы современного моделирования.

5. Область практического применения теоремы в метеорологии циклонов позволяет по вектору тангенциальной скорости в исследуемой точке вихревой трубки циклона установить его циркуляцию и классифицировать циклоны по критерию его вихревой активности (разрушительной силы).

Заключение

Теорема о погонной плотности циркуляции и её следствия, предложенные авторами статьи, позволяют не только решить одно из основных противоречий процесса исследования вихреобразования, но также обладают практической значимостью в сфере определения оптимальной высоты воздухозаборников силовых установок воздушных судов над поверхностью аэродрома (материнского облака), которая определяет критический энергообмен вихря (циклона) в естественной среде.

Библиографический список

Белоцерковский С. М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью / С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ. М.: Наука, 1978. 351 с.

Быстрай Г. П. Вихреобразование в атмосфере при повышенной влажности с нелинейными стоками и источниками / Г. П. Быстрай, И. А. Лыков, С. А. Охотников // Вестник кибернетики. 2012. № 11. С. 86-97. EDN PCKOXZ.
Даниленко Н. В. Рабочий процесс вихреобразования сред Земли / Н. В. Даниленко, А. Г. Киренчев // Вестник Московского авиационного института. 2018. № 25 (3). С. 161-170. EDN XZTVGX.
Даниленко Н. В. Торнадо // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2004. № 2(18). С. 64-72. EDN PCLYAR.
Киренчев А. Г. Особенности обслуживания воздушных судов в поле стоковых вихрей силы Кориолиса: монография / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2022. 140 с.
Комов А. А. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на вихреобразование ГТД // Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Научных чтений памяти К. Э. Циолковского, Калуга, 15–17 сентября 2020 года. Часть 1. Калуга: Эйдос, 2020. С. 353-357. EDN IVQVQU.
Котовский В. Н. Техническая термодинамика. М.: МГТУ ГА, 2015. 86 с.
Кушин В. В. Смерч. М.: Энергоатомиздат, 1993. 126 с.
Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1970. 904 с.
Наливкин В. Д. Смерчи. М.: Наука, 1984. 112 с.
Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи: Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 488 с.
Нечаев Ю. Н. Теория авиационных двигателей. Часть 1 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский. М.: Наука, 2005. 657 с.
Ништ М. И. Аэродинамика боевых летательных аппаратов и гидравлика их систем. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1994. 570 с.
Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука. 1974. 416 с.
Espie J. P. Philosophy of storms. Boston: Charles C. Little and James Brown, 1841. 552 p.

References

Belotserkovsky S. M., Nisht M. I. (1978). Detachable and non-detachable streamline of thin wings by an ideal fluid. Moscow: *Nauka*, 1978. 351 p. (in Russian)
Bystray G. P., Lykov I. A., Okhotnikov S. A. (2012). Vortex formation in the atmosphere at high humidity with nonlinear sinks and sources. *Bulletin of Cybernetics*. 11: 86-97. (in Russian)
Danilenko N. V. (2004). Tornado. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University.* 2(18): 64-72. (in Russian)
Danilenko N. V., Kirenchev A. Г. (2018). Workflow of vortex formation of the Earth's media. *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 25(3): 161-170. (in Russian)
Espie J. P. (1841). Philosophy of storms. Boston: *Charles C. Little and James Brown*, 1841. 552 p.
Kirenchev A. G., Danilenko N. V. (2022). Features of Aircraft Service in the Field of Coriolis Force Stock Vortices: Monograph. Irkutsk: *Irkutsk branch of MSTU GA*, 2022. 140 p. (in Russian)
Komov A. A. (2020). Influence of constructive and operational factors on vortex formation of GTE. *Scientific value of K.E. Tsiolkovsky's works: history and modernity: materials of the 55th Scientific Readings in memory of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga: Eidos, 2020. P. 353-357. (in Russian)
Kotovsky V. N. (2015). Technical thermodynamics. Moscow: *MSTU GA*, 2015. 86 p. (in Russian)
Kushin V. V. (1993). Tornado. Moscow: *Energoatomizdat*, 1993. 126 p. (in Russian)
Loytsyansky, L. G. (1970). Mechanics of Liquid and Gas. Moscow: *Nauka*. 1970. 904 p. (in Russian)
Nalivkin D. V. (1969). Hurricanes, storms and tornadoes: Geographical features and geologic activity. Leningrad: *Nauka*, 1969. 488 p. (in Russian)
Nalivkin V. D. (1984). Tornadoes. Moscow: *Nauka*, 1984. 112 p. (in Russian)
Nechaev Y. N., Fedorov R. M., Kotovsky V. N. (2005). Theory of Aviation Engines. Part 1. Moscow: *Nauka*, 2005. 657 p. (in Russian)
Nisht M. I. (1994). Aerodynamics of Combat Aircraft and Hydraulics of their Systems. Moscow: *VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky*, 1994. 570 p. (in Russian)
Targ S. M. Short Course of Theoretical Mechanics. Moscow: *Nauka*. 1974. 416 p. (in Russian)