УДК 629.7.036.3

ББК 39.15

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВИХРЕЙ ВОЗДУХОЗАБОРНИКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

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 обозначены основные проблемы познания явления вихреобразования и его естественных и техногенных вихрей. Дано новое определение вихреобразования, построенное на физической сущности рабочего процесса. Представлено математическое обоснование рабочего процесса вихреобразования с использованием теоремы профессора Н. Е. Жуковского о подъемной силе крыла, а также уравнения сохранения энергии движения газа и теоремы Стокса о равенстве напряжения вихря и циркуляции скорости. На основании анализа уравнения сохранения энергии выявлены основные факторы генерации и аккумуляции естественных и техногенных вихрей. Исследован вопрос определяющей роли подстилающей поверхности на процесс формирования вихрей стокового типа воздухозаборников газотурбинных

силовых установок воздушных судов. Отмечено влияние других внешних факторов на сущность образования техногенных вихрей. Дана классификация техногенного ВО и его вихрей по сущности рабочего процесса.

Ключевые слова: вихреобразование, техногенные вихри, интерференция вихрей, роль подстилающей поверхности, газотурбинные силовые установки, математическое обоснование вихрей силы Кориолиса, воздухозаборник.

PECULIARITIES OF VORTEX INTERFERENCE OF AIR INTAKES OF GAS-TURBINE POWER PLANTS WITH THE UNDERLYING SURFACE

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 considers the basic problems of vortex formation phenomenon and its natural and technogenic vortices. A new definition of vortex formation based on the physical essence of the working process is given. The mathematical foundation of the working process of vortex formation is presented with the use of Professor N. E. Zhukovsky’s theorem about the lifting force of the wing, as well as the equation for conservation of the gas movement energy and the Stokes theorem about the equality of the vortex tension and velocity circulation. Due to the analysis of the energy conservation equation the main factors of generation and accumulation of natural and technogenic vortices are revealed. The issue of the determining role of the underlying surface for forming effluent vortices of air intakes of aircraft gas-turbine propulsion systems is investigated. Influence of other external factors on the formation of technogenic vortices is noted. Classification of technogenic vortex formation and its vortices by the essence of the working process is given.

Keywords: vortex formation, technogenic vortices, vortex interference, the role of the underlying surface, gas turbine power plants, mathematical justification of Coriolis force vortices, air intake.

Проблема атмосферного вихреобразования (ВО) известна с давних времён в виде загадочных и непонятных природных смерчей (торнадо) (рис. 1 А). Но с последних 50-ти лет эта проблема проявила себя в поле эксплуатации реактивной авиации. Работа газотурбинных двигателей (ГТД) у земли (аэродрома, экрана и др.) на повышенных режимах и большой секундный массовый расход воздуха через ГТД – обязательные условия появления перед их воздухозаборниками (ВЗ) техногенных вихрей в большом разнообразии их газодинамических форм (см. рис. 1 Б).

Рисунок 1 – Вихреобразование: А – смерч; Б – вихри воздухозаборника

Интерференции стокового потока с подстилающей поверхностью отводится особая роль в техногенном ВО. Его вихри – главная проблема технической эксплуатации газотурбинных силовых установок (ГТСУ) на земле. Эта проблема проявляет себя вихревым засасыванием внутрь проточной части

ВЗ ГТСУ и её двигателей посторонних предметов (ПП). Как следствие, разрушение рабочих лопаток компрессоров ГТД, помпаж, досрочный съём двигателей с эксплуатации (ДСД), либо отказы в полёте, предпосылки к лётным происшествиям и снижение безопасности полётов.

Как известно, вихри ВЗ при работе ГТД на земле – не разрешённое техническое противоречие, которое требует его познания. Проблема состоит в том, что вихрь ВЗ, как газодинамическое явление, – загадка для мировой науки [Факты о торнадо, 2019; Киктёв, 2019]. Её учёные столкнулась с проблемами физической сущности и рабочего процесса (РП) подобных им торнадо, как крупногабаритных аналогов вихрей ВЗ авиационной ГТСУ при работе двигателей на аэродроме.

Ныне известно, что определяющая доля секретов техногенных вихрей и естественных смерчей кроется в интерференции стокового потока ГТСУ (материнского облака) с подстилающей поверхностью. В качестве подстилающей поверхности в естественных условиях традиционно выступают поверхность земли и (или) воды. В техногенном ВО роль подстилающей поверхности более разнообразная и более сложная. А именно, её роль исполняют земля (аэродром) и (или) вода. Но для ГТСУ воздушного судна (ВС) к числу подстилающих поверхностей следует относить поверхность фюзеляжа, смежно расположенной мотогондолы, а также газодинамическую поверхность раздела стоковых потоков парно работающих на близком расстоянии газотурбинных двигателей (см. рис. 1 Б – горизонтальный вихрь ВЗ). Свойством подстилающей поверхности наделены стенки крупногабаритных средств технического обслуживания, контейнеров, более мелких предметов, находящихся в поле стокового потока ГТСУ (рис. 2).

Рисунок 2 – Проблемы техногенных вихрей на земле: помпаж; засасывание ПП; разрушения лопаток ОК; вихри ВЗ истребителя F16 соответственно

Свойство замыкания вихря на ближайшую подстилающую поверхность определено следствием теоремы Гельмгольца о постоянстве циркуляции по его длине [Ефремова, 2000]. При временной изоляции вихря от земли он замыкается на поверхность фюзеляжа (см. рис. 2, *F*16), соседней мотогондолы и т. д.

Ныне методы борьбы с последствиями техногенного ВО сводятся к очистке ВПП от ПП, песка, кусочков льда, снега, и др., а также к установке различных средств защиты, как на ГТСУ, так и на колёса шасси ВС, расположенные перед ВЗ. Но всё это лишь борьба с последствиями проблемы ВО стокового типа на уровне поиска технических решений. Они будут более эффективны при осознании и установлении сущности ВО в поле интерференции стокового потока ВЗ ГТСУ с подстилающей поверхностью.

Стоит научная задача теоретического и экспериментального познания сущности явления техногенного ВО и установления характерных особенностей и свойств интерференции стокового потока воздухозаборника ГТСУ и его вихрей с подстилающей поверхностью земли на основе возникших техногенных противоречий.

Ныне можно выделить ряд основных проблем в понимании явления интерференционного техногенного ВО:

1. Отсутствие определения ВО по сущности его рабочего процесса.
2. Нет математического обоснования рабочего процесса ВО, источников его энергии, факторов активации и аккумуляции вихревой активности среды.

3. Отсутствие учёта роли суточного вращения Земли в процессе стокового техногенного вихреобразования.

4. Не указана роль подстилающей поверхности в процессе образования техногенных вихрей различной природы.

Далее перейдем к разрешению каждой из перечисленных проблем.

Определение ВО, существующее на данный момент, можно найти в словаре русского языка Т. Ф. Ефремовой [Ефремова, 2000]. Оно трактуется следующим образом «*Вихреобразование – образования вихря, вихрей*».

Как видим, по профилю лингвиста это определение является верным, но оно абсолютно не содержит физическую сущность и РП данного явления. С учётом указанного замечания авторы предлагают новое определение:

«*Вихреобразование – это газодинамический процесс преобразования потенциального течения газа* ($\omega = 0$) *в течение вихревое с образованием вихрей и более мелкой завихренности* ($\omega \neq 0$) *в поле внешнего и внутреннего воздействия на исследуемую среду*».

Данное определение более полно, но не совсем достаточно раскрывает направление процесса ВО и критерий его присутствия посредством угловой скорости ($\omega \neq 0$, [Ништ, 1994]) в исследуемой струйке подвижной стоковой среды.

Перейдем к решению второй проблемы ВО по сути математического обоснования РП вихря и вихрей. Известно, что ВО определено наличием циркуляции скорости Г в исследуемой среде [Ништ, 1994]. Фактор наличия циркуляции скорости Г можно выделить из формулы подъёмной силы, предложенной проф. Н. Е. Жуковским в своей теореме о подъёмной силе крыла

$$\boldsymbol{Y = \rho V\,\Gamma\; l = f\,(\rho V, \Gamma, l)},$$

где произведение ρV – плотность тока, а параметр l – размах крыла [Ништ, 1994].

Используя аэродинамический принцип обратимости [там же], находим выражение циркуляции скорости Г и её функциональную зависимость:

$$\boldsymbol{\Gamma = Y / (\rho V\, l) = f\,(Y,\ \rho V\ \text{и}\ \ l)},$$

из которой следует, что любое силовое ($Y \neq 0$), газодинамическое ($\rho V \neq 0$) и геометрическое ($l \neq 0$) воздействие на среду сопровождается генерацией циркуляции скорости Г, то есть техногенным вихреобразованием, примыкающим не только к крылу, постилающей поверхности, но и к элементам внешних и внутренних поверхностей ГТСУ, например, рабочим лопаткам первой ступени компрессора, либо его вентилятора.

Другие пути генерации вихрей и ВО можно выявить из теоремы Стокса [Ништ, 1994], устанавливающей равенство напряжения вихря Г и его циркуляции I.

$$\boldsymbol{\Gamma = 2\iint\limits_{S} \omega\, dS = \oint\limits_{l} V_{\tau}\, dl = I.}$$

Из теоремы и формулы Стокса следует, что вихри также могут появляться в следующих случаях:

I – за счёт сбора внешней завихренности, определяемой вращением ($\omega \neq 0$) частиц внешней стоковой среды перед ВЗ (воздушным винтом, вентилятором);

II – за счёт циркуляции скорости V_{τ} по круговому замкнутому контуру l;

III – за счёт энергообмена посредством механической работы, а также использования ресурсов внутренней и кинетической энергии.

Основные генераторы ВО можно выделить из уравнения сохранения энергии движения газа [Нечаев, 1990], добавив в него фактор кинетической энергии вращательного движения газа $\boldsymbol{J\frac{\omega_i^2}{2}}$ [Тарг, 1986]. Тогда имеем следующую функциональную зависимость фактора техногенного вихреобразования в струйке тока 1-2 стокового потока (типа)

$$\boldsymbol{J\frac{\omega_2^2}{2} = f\left(J\frac{\omega_1^2}{2},\ \pm\Delta u,\ \pm\frac{\Delta V^2}{2},\ \pm L_{\text{вн}},\ \pm Q_{\text{вн}}\right)},$$

где $J\dfrac{\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия вращательного движения газа исследуемой струйки тока 1-2;

Δu – расходуемый запас внутренней энергии в струйке тока;

$\frac{\Delta V^2}{2}$ – реализованный запас кинетической энергии струйки тока;

$L_{\text{вн}}$ и $Q_{\text{вн}}$ – энергообмен посредством удельной механической работы и теплоты.

Из полученной функциональной зависимости находим, что каждый из источников энергии ВО и генерации его вихрей при энергообмене поочерёдно, либо совместно вносит свою лепту в активацию (подавление) вихревой активности в исследуемой струйке тока стокового течения перед ВЗ.

Ярким примером такого эффекта может быть генерация вихревой активности ($J\frac{\uparrow\omega_i^2}{2}$) посредством введения в задачу численного моделирования нового граничного условия – отклоняющего действия силы Кориолиса [Тарг, 1986] в разработанном авторами модифицированном методе дискретных вихрей проф. С. М. Белоцерковского [Белоцирковский, 1965].

Численный метод построен на выражении взаимосвязи силы $F_{\text{кор}}$ Кориолиса (одноимённого кориолисова ускорения $a_{\text{кор}}$) с угловой скоростью суточного вращения $\Omega_{\text{З}}$, относительной скоростью V_τ стокового потока у земли перед ВЗ и географической широтой λ

$$\boldsymbol{F}_{\text{кор}} = 2\boldsymbol{m}\,\boldsymbol{a}_{\text{кор}} = 2\,\boldsymbol{m}\,\boldsymbol{\Omega}_{\text{З}}\,\boldsymbol{V}_\tau \sin\boldsymbol{\lambda}.$$

Здесь все параметры правой части равенства известны. В поле импульса силы ($\boldsymbol{F}_{\text{кор}}\ \Delta\boldsymbol{t}$) и рассматриваемого кориолисова ускорения ($\boldsymbol{a}_{\text{кор}} = \boldsymbol{\Omega}_{\text{З}}\ \boldsymbol{V}_\tau\ \sin\ \lambda$) находится отклоняющая скорость $\boldsymbol{c}_{\text{n кор}}$ Кориолиса, преобразующая потенциальное стоковое течение перед ВЗ в течение вихревое. Оно построено на интерференционном накоплении циркуляции кориолисовых вихрей стокового типа у подстилающей поверхности (плоском экране). Их активность определена удвоенным эффектом стягивания линий тока (рис. 3) и вихревых нитей к линии мнимого стока **а-а** и образования вихревого жгута (ВЖ) циклонической закрутки [Даниленко, 1987, 2011, 2018] повышенной плотности циркуляции скорости $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\Gamma}/\boldsymbol{F}_{\text{в.ж}}$.

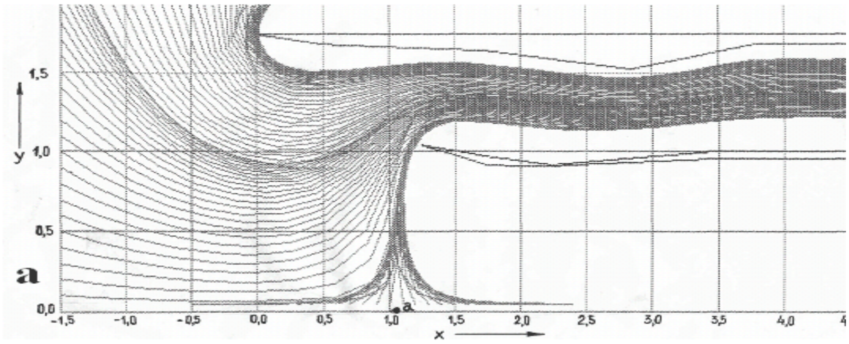

Рисунок 3 – Стягивающий эффект в поле интерференции экрана и стока

Ярким примером такой интерференции стокового потока с подстилающей поверхностью является эффект аккумуляции вихревой активности (см. рис. 1) вокруг линии мнимого стока (продольной оси **а-а** сгустка линий тока, рис. 3).

Эффект вихревой аккумуляции определён и удвоен зеркальным эффектом плоского экрана и следствием теоремы Гельмгольца о замыкании свободных концов вихрей на подстилающую поверхность, в каждой точке которой выполняется граничное условие непротекания ($\boldsymbol{c_{n\,y=0}} = \mathbf{0}$).

Подстилающей поверхности также присуща интерференция в размывании вихрей избыточным давлением (рис. 4 В) при низком положении ВЗ над землёй. Здесь очевиден процесс обратного типа. А именно, при потере непротекания тела вихревой трубки в поле её расширения и снижения погонной плотности циркуляции у точки мнимого стока (см. рис. 4 В) вновь активируется зона повышенного давления (см. рис. 4 А). Видим, газодинамическое воздействие избыточного давления на внутреннюю поверхность вихревой трубки способствует разбросу её вихрей. Она расширяется в диаметре. Погонная плотность вихрей ещё больше уменьшается. Вихревая трубка теряет свою устойчивость. Избыточное давление в вихре возрастает, и он переводит в вихрь «размытой» интенсивности (см. рис. 4 В).

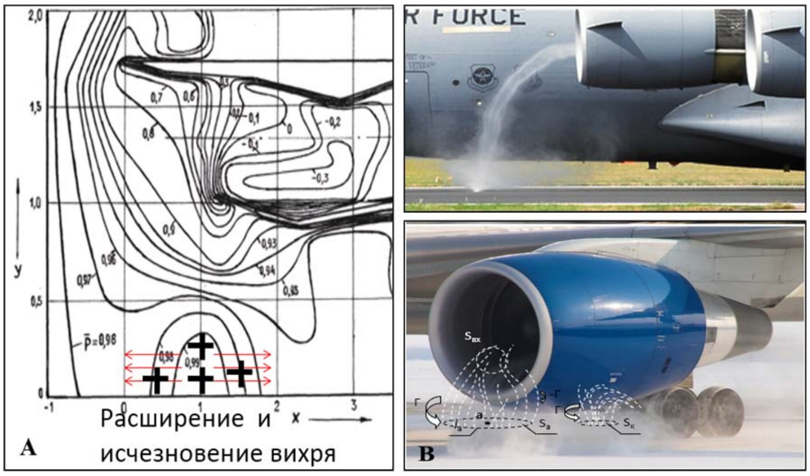

Рисунок 4 – Интерференционное (А) преобразование
активного вихря (Б) в вихрь размытой интенсивности (В)
в поле центробежного и вихревого разброса

Заключение. Интерференция вихря и подстилающей поверхности в поле стокового течения очевидна. Зная РП интерференции, можно управлять процессом ВО с подавлением его активности или получения положительного эффекта (предотвращения помпажа компрессора ГТД и др.). Материалы данной статьи могут быть использованы при создании основ теории техногенного и естественного вихреобразования.

Библиографический список

1. Аэродинамика боевых летательных аппаратов и гидравлика их систем / под ред. М. И. Ништа. М.: ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1994. 570 с.
2. *Белоцерковский С. М.* Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. М.: Наука, 1965. 244 с.
3. *Даниленко Н. В.* Применение метода дискретных вихрей для моделирования вихревых течений на входе в воздухозаборные каналы силовых установок с ВРД, / Н. В. Даниленко, С. В. Пахомов // III Всесоюз. симп. «Метод дискретных особенностей в задачах математической физики и его роль в развитии численного эксперимента на ЭВМ»: сб. тезисов докладов. Харьков: Харьк. ГУ, 1987. С. 78–79.
4. *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. Изд. 2 (дополн.). Иркутск: МГТУ ГА (Ирк. филиал), 2011. 350 с.

5. *Даниленко Н. В.* Вихреобразование стоковых течений / Н. В. Даниленко, А. Г. Киренчев // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 28–36.

6. *Ефремова Т. Ф.* Новый словарь русского языка. Толково-образовательный. М.: Рус. яз., 2000. в 2 т. 1209 с.

7. Киктёв Д. Б. Заместитель директора Гидрометцентра // [Электронный ресурс]. – 2013. URL: https://rg.ru/2013/05/22/tornado.html (дата обращения 06.12.2019).

8. *Нечаев Ю. Н.* Теория авиационных двигателей. М.: Воен.-возд. инженер. ак-я им. проф. Н. Е. Жуковского, 1990. 703 с.

9. *Тарг С. М.* Краткий курс теоретической механики: учеб. для втузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.

10. Факты о торнадо: почему возникают смерчи и когда они становятся разрушительными? // [Электронный ресурс]. – 2019. URL: https://vokrugsveta.ua/science/fakty-o-tornado-pochemu-voznikayut-smerchi-i-kogda-oni-stanovyatsya-razrushitelnymi-07-03-2019 (дата обращения 06.12.2019).

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. *Belocerkovskij S. M.* (1965) Thin lifting surface in a subsonic gas flow. M.: Nauka, 1965. 244 p. (in Russian)

3. *Danilenko N. V.* (1987) Application of the discrete vortex method for modelling vertical flows at the inlet of air intakes of an air-breathing engine / N. V. Danilenko, S. V. Pahomov // 3rd all-Union symposium «Discrete singularity method in mathematical physics problems and its role for the development of computerized numerical experiment»: collection of reports. Kharkov: Kharkov SU, 1987. P. 78–79. (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.* (2018) Vortex formation of effluent flows / N. V. Danilenko, A. G. Kirenchev // Bulletin of Moscow aviation institute. 2018. V. 25. № 4. P. 28–36. (in Russian)

6. *Efremova T. F.* (2000) New dictionary of the Russian language. Explanatory-educational. M.: Rus. yaz., 2000. in 2 V. 1209 p. (in Russian)

7. *Kiktjov D. B.* (2013) Deputy director of Russia's weather service // [Electronic source]. – 2013. URL: https://rg.ru/2013/05/22/tornado.html (accessed date 06.12.2019) (in Russian)

8. *Nechaev Ju. N.* (1990) Theory of aircraft engines. M.: Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1990. 703 p. (in Russian)

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

10. Facts about tornadoes: why do tornadoes occur and when do they become destructive? // [Electronic source]. – 2019. URL: https://vokrugsveta.ua/science/fakty-o-tornado-pochemu-voznikayut-smerchi-i-kogda-oni-stanovyatsya-razrushitelnymi-07-03-2019 (accessed date 06.12.2019) (in Russian)