

УДК 532.529

ДВОЙНАЯ ВИНТОВАЯ СПИРАЛЬ КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ СВОБОДНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕЙ

Член-корреспондент РАН А. Ю. Вараксин^{1,2,*}, А. А. Мочалов^{1,2}

Поступило 06.03.2019 г.

В работе впервые обнаружена и описана двухспиральная нестационарная структура из взаимодействующих вихревых нитей, предвещающая генерацию свободного нестационарного воздушного вихря.

Ключевые слова: свободные нестационарные вихри, генерация воздушных вихрей, двойная винтовая спираль, взаимодействующие вихревые потоки.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524872144-146>

Вихревое движение является одной из распространённых форм движения сплошных сред. Вихревые (или закрученные) воздушные потоки чрезвычайно широко распространены в природе (атмосферные циклоны, пыльные “дьяволы”, песчаные бури, воздушные и огненные смерчи) и находят своё применение во многих технических приложениях (вихревые топочные камеры и горелки, циклонные сепараторы, вихревые трубы, центробежные форсунки, вихревые ячейки, различные турбулизаторы и т.п.) [1, 2].

Ограниченные стенками стационарные вихревые течения формируют посредством тангенциального соплового подвода среды, использования вентиляторов и механических закручивающих устройств (направляющих закручивающих лопаток, винтов, шнеков, внутреннего спирального оребрения и т.п.), а также путём интенсивного вращения корпусных элементов каналов (вращающихся труб) [2, 3].

Хорошо известно, что турбулентность (особенно в сдвиговых течениях) не является чисто стохастическим явлением, а представляет собой набор когерентных структур (или организованных движений) — “пятен”, “подков”, “шпилек” и т.п. Генерация и эволюция указанных структур тесным образом связаны с взаимодействием и распадом вихрей разных масштабов.

Одним из интересных фактов является существование в турбулентном потоке протяжённых продольных вихрей (вихревых нитей), продольный размер которых может на порядки превышать их диаметр. Известно, что в реальных жидкостях продольные

вихревые структуры существуют не в виде прямолинейных вихрей, а в виде различного рода спиралей. Так, наиболее распространены винтовые вихри.

Существование структур из одинаковых винтовых вихрей (мультиплетов) с осями, лежащими на общем образующем цилиндре и сдвинутыми относительно друг друга на одинаковый угол, было предсказано теоретически [4, 5]. Большинство исследований касаются изучения простейших вихревых мультиплетов, а именно дуплетов, называемых также двухспиральными или двойными вихрями. Так, в [6] зафиксировано спиральное скручивание двух протяжённых вихрей в пограничном слое. В [7] наблюдалось нестационарное взаимодействие двух вихревых нитей при естественной конвекции во вращающемся объёме, причём конечной стадией было слияние двух вихрей в один более мощный. Система шпилькообразных вихрей [8], обнаруженная в следе за телом в погранслое, однозначно является двухспиральной. Часто образование двойной спирали сопровождается процессом распада вихря [9]. В [10] в вихревой камере с двухскатным дном была впервые обнаружена и визуализирована стационарная двойная спираль, состоящая из пары переплетённых вихревых нитей. Визуализация осей двух переплетённых вихрей осуществлялась за счёт образующихся из-за разрядки воздушных нитей.

Целью настоящей работы является обнаружение двойной винтовой спирали (переплетённой пары вихревых нитей) в качестве возможного физического механизма генерации нестационарного концентрированного вихря.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Используемая в работе простая установка, параметры тепловых режимов, а также последователь-

¹Объединённый институт высоких температур
Российской Академии наук, Москва

²Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

*E-mail: varaksin_a@mail.ru

ность проведения экспериментов подробно описаны в работе [11]. Установка позволяет осуществлять контролируемый нагрев газовой горелкой, использующей сжиженную пропано-бутановую смесь, подстилающей поверхности алюминиевого листа (диаметр — 1100 мм, толщина — 1,5 мм). Максимальная тепловая мощность горелки — 3,5 кВт, диаметр пламени варьировался для разных тепловых режимов от 200 до 300 мм. Верхняя (подстилающая) поверхность алюминиевого листа была зачернена жаростойкой краской. Нагрев листа снизу приводит к генерации свободных нестационарных воздушных вихрей вследствие создания над ним неустойчивой стратификации воздуха.

Эксперименты проводились на различных тепловых режимах, характеризующихся своими временами нагрева (τ_h), временами охлаждения (τ_c) и величиной максимальной температуры в центре подстилающей поверхности (T_{cmax}). Приводимые ниже результаты были получены при работе на режиме № 3 [11], для которого $\tau_h = 180$ с, $\tau_c = 1200$ с, $T_{cmax} = 500$ К. Для указанных параметров реализовался следующий диапазон чисел Рэлея $Ra = O(10^7 - 10^8)$.

Фотосъёмка генерируемых воздушных вихрей производилась с помощью кросскорреляционной камеры (модель GEV-B2020M, Imrepx, США) разрешением 2048 × 2048 пикселей.

Необходимо отметить, что в описываемом исследовании генерация свободных нестационарных воздушных вихрей происходила без использования механических закручивающих устройств [12–15].

Для визуализации образуемых вихревых структур применялись капли-трассеры (диаметр 1–5 мкм), которые получались путём испарения жидкой глицериновой плёнки, наносимой тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов.

Покадровый анализ позволял получать информацию о целом ряде параметров процесса генерации воздушных вихрей (область возникновения, характерные температуры поверхности, количество вихрей за один эксперимент) и характеристиках последних (диаметр, высота, время жизни, направление вращения) [11]. В [13] показано, что число Россби генерируемых в настоящих экспериментах нестационарных вихрей равнялось $Ro = O(10^5)$.

При проведении настоящей работы главный акцент делался на выявлении физических механизмов генерации нестационарного воздушного вихря. В экспериментах неоднократно в начальной стадии

формирования воздушного вихря в его корневой области была обнаружена переплетённая пара винтовых нитей (двойная винтовая спираль).

На рис. 1а приведён типичный кадр с зафиксированным вихрем. Из рисунка видно, что благодаря более низкому давлению в центре вихрей капли глицерина собираются на их оси, образуя хорошо наблюдаемые тонкие нити 1 и 2 (см. также схему на рис. 1б). Взаимодействуя между собой, эти вихревые нити переплетаются, формируя двойную винтовую спираль 3. Сделано предположение, что описанный процесс взаимодействия схожих по своей структуре вихревых нитей является одним из возможных механизмов роста концентрации завихренности, приводящей к генерации воздушного вихря 4 большей интенсивности. Указанный механизм реализует так называемый обратный каскад трансформации энергии вихрей в область больших пространственно-временных масштабов и низких частот. Необходимо отметить, что выявленная двойная винтовая спираль является сильно нестационарной структурой.

Покадровый анализ видеозаписей позволил получить следующую информацию о строении двойной винтовой спирали: 1) диаметр двойной спирали; 2) диаметр винтовых вихрей, образующих двойную спираль; 3) количество полных витков двойной спирали; 4) видимая высота двойной спирали.

Многочисленные повторения экспериментов позволило сделать следующие заключения о геометрии двойной винтовой спирали. Максимальный диаметр

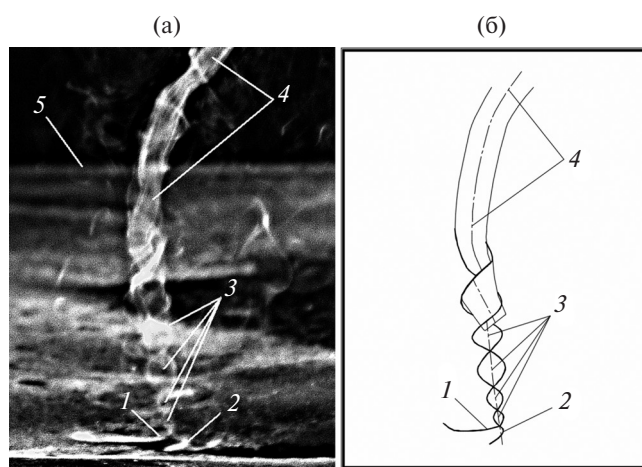


Рис. 1. Механизм генерации воздушного вихря: а — типичная фотография (размер изображения 155 × 200 мм); б — схема формирования двойной спирали. 1, 2 — исходные вихревые нити; 3 — витки сформированной двойной винтовой спирали; 4 — свободный нестационарный воздушный вихрь; 5 — край подстилающей поверхности.

двойной спирали достигал 25 мм, а диаметр образующих её винтовых нитей лежал в диапазоне от 1 до 3 мм. Количество видимых полных витков двойной спирали составляло от 3 до 6, её высота достигала 80–100 мм.

Таким образом, в данном эксперименте впервые обнаружена и описана двухспиральная нестационарная структура из взаимодействующих вихревых нитей, предвещающая генерацию свободного нестационарного воздушного вихря.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18–08–01382_a), а также при поддержке Минобрнауки России (госзадание № 13.5521.2017/БЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.
2. *Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2005. 504 с.
3. *Varaksin A.Yu.* // High Temperature. 2016. V. 54. № 3. P. 409–427.
4. *Okulov V.L.* // J. Fluid Mech. 2004. V. 521. P. 319–342.
5. *Okulov V.L., Sorensen J.N.* // J. Fluid Mech. 2007. V. 576. P. 1–25.
6. *Chandrsuda C., Mehta R.D., Weir A.D., Bradshaw P.* // J. Fluid Mech. 1978. V. 85. P. 693–704.
7. *Boubnov B.M., Golitsyn G.S.* // J. Fluid Mech. 1986. V. 167. P. 503–531.
8. *Acarlar M.S., Smith C.R.* // J. Fluid Mech. 1987. V. 175. P. 1–41.
9. *Leibovich S.* // Ann. Rev. Fluid Mech. 1978. V. 10. P. 221–246.
10. *Alekseenko S.V., Shtork S.I.* // JETP Lett. 1994. V. 59. P. 775–780.
11. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* // The 6th Int. Symp. on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion // AIP Conference Proc. 2010. V. 1207. P. 342–347.
12. *Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* // High Temperature. 2010. V. 48. № 3. P. 411–415.
13. *Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A.* // High Temperature. 2011. V. 49. № 2. P. 310–313.
14. *Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A.* // High Temperature. 2012. V. 50. № 4. P. 496–500.
15. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 817–828.

DOUBLE SPIRAL VORTEX AS A POSSIBLE REASON OF WALL-FREE NON-STATIONARY AIR VORTICES GENERATION

Corresponding Member of the RAS **A. Yu. Varaksin**^{1,2}, **A. A. Mochalov**^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Received March 6, 2019

In this work, for the first time, a double spiral non-stationary structure of interacting helical filaments, preceding the generation of a non-stationary air vortex, was discovered and described.

Keywords: wall-free non-stationary vortices, air vortex generation, double helical structure, interacting vortical flows.