

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРЕВА

П.Б. Дермер¹

dermer@bmstu.ru

А.Ю. Вараксин^{1,2}

varaksin_a@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Существует принципиальная возможность генерации свободных нестационарных тепловых вихрей без использования механических закручивающих устройств. Исследована возможность интенсификации процесса генерации свободных концентрированных воздушных вихрей путем увеличения температурной неустойчивости воздуха. Генерация вихрей осуществлялась над подстилающей поверхностью (лист алюминия) за счет создания неустойчивой стратификации воздуха при его нагреве снизу. Разработана простая экспериментальная установка, позволяющая изменять градиент температуры воздуха в вертикальном направлении. Проведена серия экспериментов при создании температурной стратификации путем одновременного нагрева воздуха снизу и его охлаждения сверху. Нагрев воздуха осуществлен контролируемым нагревом подстилающей поверхности с помощью газовой горелки. Охлаждение воздуха проведено с использованием сухого льда, располагаемого сверху над подстилающей поверхностью. Динамика вихрей и их интегральные параметры (видимая высота, диаметр) определены путем видеосъемки. Покадровый анализ видеозаписей позволил провести качественный анализ пространственно-временной структуры нестационарных вихревых образований. Сделан вывод об интенсификации процесса вихреобразования с увеличением вертикального градиента воздуха. Указанный эффект проявлялся в виде увеличения среднего числа наблюдаемых вихрей за один эксперимент, а также в росте их интенсивности (характерной скорости, геометрии) и устойчивости (времени жизни)

Ключевые слова

Свободные воздушные вихри, концентрированные вихри, генерация вихрей, неустойчивая стратификация, охлаждение, нагрев

Поступила в редакцию 16.08.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Вихревое движение — одно из самых распространенных состояний движущейся сплошной среды. К настоящему времени накоплен громадный по объему материал, касающийся изучения различных вихревых структур, имеющих место в струйных потоках, турбулентных пограничных слоях, в отрывных

течениях при обтекании тел, потоках проводящей жидкости в электромагнитных полях и т. п.

Среди многообразия вихревых структур выделяются концентрированные вихри — компактные пространственные области с высокими значениями завихренности, окруженные течением с существенно более низкой (в случае идеальной жидкости — с нулевой) завихренностью.

Концентрированные вихри широко распространены в земной атмосфере [1–4], на Солнце [5–8] и используются в различных технических устройствах (вихревая труба Ранка — Хилша, вихревые топочные камеры и вихревые горелки, циклонные сепараторы, вихреобразующие неоднородности на теплообменных поверхностях и др.).

Как правило, свободные и ограниченные стенками вихревые потоки формируют с использованием механических закручивающих устройств (вентиляторы, тангенциальный подвод среды, направляющие закручивающие лопасти, шнеки, внутреннее спиральное оребрение, интенсивное вращение подложек и корпусных элементов каналов и т. д.) [9–13]. Получаемые таким образом стационарные вихревые течения удобны для подробного экспериментального изучения, однако их параметры могут существенно отличаться от параметров реальных нестационарных вихревых структур, характеризующихся спонтанностью образования и пространственно-временной нестабильностью. Указанные обстоятельства стали причиной того, что к настоящему времени практически отсутствуют экспериментальные работы, посвященные вопросам генерации, устойчивости и динамики свободных нестационарных концентрированных вихрей. Исключением являются работы авторов по изучению возможностей генерации и управления поведением свободных нестационарных воздушных [14, 15] и огненных [16] вихрей.

Цель настоящей работы — изучение возможности интенсификации процесса генерации свободных нестационарных вихрей в лабораторных условиях за счет увеличения вертикального градиента температуры воздуха.

Экспериментальная установка и результаты. Далее опишем экспериментальную установку и некоторые результаты исследований условий генерации концентрированных воздушных вихрей в условиях переменного вертикального градиента температуры воздуха.

Для генерации концентрированных воздушных вихрей применена простая установка, схема которой приведена на рис. 1. Установка располагалась в комнате площадью $6 \times 6 \text{ м}^2$ с полом 1, потолком 2 (высота 3,3 м) на расстоянии 0,7 м от одной из стен 3. Она представляла собой круглый стол 4 (высота 0,35 м) с горизонтальной поверхностью из листа алюминия (марка Д16АМ) диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм с тремя ножками 5. Верхняя (подстилающая) поверхность листа алюминия была зачернена жаростойкой краской. Под столом размещалась газовая горелка 6, снабженная электрическим поджигом. Диаметр пламени 7 горелки составлял 250 мм. Сжиженная пропанобутановая смесь, необходимая для работы газовой горелки, помещена в баллон 8 емкостью 27 л.

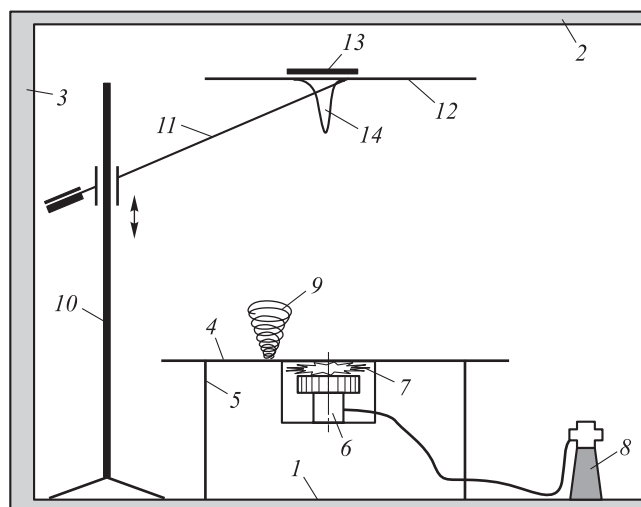


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для генерации воздушных вихрей:

1 — пол; 2 — потолок; 3 — стена; 4 — стол; 5 — ножки стола; 6 — газовая горелка; 7 — пламя горелки; 8 — баллон; 9 — нестационарные вихревые структуры; 10 — стойка; 11 — штанга; 12 — сетка; 13 — сухой лед; 14 — поток охлажденного воздуха

Описанная установка позволяет осуществлять контролируемый нагрев подстилающей поверхности листа алюминия, приводящий к генерации нестационарных вихревых структур 9 вследствие создания неустойчивой стратификации воздуха [14]. Для визуализации образуемых вихревых структур использованы частицы-трассеры (частицы магнезии микрометровых размеров), которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов. Видеосъемка генерируемых вихрей выполнена цифровой видеокамерой (*Sanyo VCC-6572P*, Япония).

Для проведения работы установку модернизировали [14]. Рядом со столом установили стойку 10, снабженную штангой 11, которую можно перемещать в вертикальном направлении. На штанге располагалась сетка 12 в форме круга диаметром 800 мм, на которую помещались цилиндрики сухого льда 13 (CO_2 в твердой фазе) общей массой 400 г. Образующийся под сеткой нисходящий поток охлажденного воздуха 14 визуализировался продуктами сублимации сухого льда.

В настоящем эксперименте кроме нагрева воздуха снизу в целях возможной интенсификации процесса генерации концентрированных вихрей была предпринята попытка его охлаждения сверху.

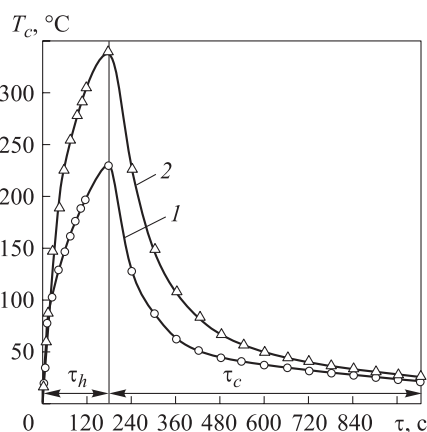
Условия стабильной генерации свободных воздушных концентрированных вихрей при нагреве воздуха снизу были найдены в работе [14]. Эксперименты проведены на шести различных тепловых режимах (таблица), характеризующихся различными режимами нагрева горелки ($P = 2$ кВт, 3,5 кВт), временем нагрева ($\tau_h = 60, 120$ и 180 с) и максимальными значениями температуры в центре подстилающей поверхности ($T_{c \max} = 147 \dots 337$ °С). «Мягкие» режимы (№ 1–3), при которых достигались относительно невысокие температуры поверхности

($T_{c\max} = 147 \dots 227 \text{ }^\circ\text{C}$), реализовывались при низких значениях тепловой мощности нагрева ($P = 2 \text{ кВт}$). Более «жесткие» режимы (№ 4–6) характеризуются более высокими значениями температуры поверхности ($T_{c\max} = 227 \dots 337 \text{ }^\circ\text{C}$), которые достигаются при больших значениях тепловой мощности ($P = 3,5 \text{ кВт}$).

Основные характеристики тепловых режимов

Номер режима	Время нагрева $\tau_h, \text{ с}$	Время охлаждения $\tau_c, \text{ с}$	Максимальная температура $T_{c\max}, \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Тепловая мощность $P = 2 \text{ кВт}$</i>			
1	60	600	147
2	120	900	197
3	180	1200	227
<i>Тепловая мощность $P = 3,5 \text{ кВт}$</i>			
4	60	600	227
5	120	900	307
6	180	1200	337

Зависимость температуры в центре подстилающей поверхности от времени $T_c = T_c(\tau)$ для двух режимов (№ 3 и 6) приведена на рис. 2. Измерения температуры поверхности осуществлялись инфракрасным термометром AZ8868 (Тайвань): диапазон измерений $-20 \dots 420 \text{ }^\circ\text{C}$; погрешность $\pm 2 \text{ } \%$. Согласно приведенным данным, указанные режимы характеризуются одинаковым временем нагрева ($\tau_h = 180 \text{ с}$) и значениями максимальной температуры $T_{c\max} = 227 \text{ }^\circ\text{C}$ (режим № 3) и $T_{c\max} = 337 \text{ }^\circ\text{C}$ (режим № 6).



Самые крупные вихри генерировались при режимах № 5 и 6 и температуре в центре поверхности $T_{c\max} > 300 \text{ }^\circ\text{C}$. При работе на «мягких» режимах (№ 2 и 3) число вихрей, наблюдаемых за один эксперимент, и их геометрические размеры были меньшими, чем при работе на «жестких» режимах (№ 4–6).

Рис. 2. Зависимость температуры в центре подстилающей поверхности от времени для режимов № 3 (1) и № 6 (2)

Распределения температуры воздуха по радиусу подстилающей поверхности $T_a = T_a(r, \tau)$ на расстоянии $y = 50 \text{ мм}$ от нее при нагреве и охлаждении для режима № 6 показаны на рис. 3. Температура воздуха измерялась термоанемометром Testo 405: диапазон измерений $-20 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$, погрешность $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Распределение температуры воздуха неоднородно; максимальные градиенты температуры воздуха реализуются в кольцевой области ($150 < r < 250 \text{ мм}$), там же,

где реализуются и максимальные градиенты температуры подстилающей поверхности. В указанной области преимущественно и происходила генерация вихревых структур. Некоторое повышение температуры в периферийной области подстилающей поверхности ($r > 400$ мм), объясняется, по-видимому, наличием восходящих потоков теплого воздуха из-под листа вследствие работы газовой горелки. При $\tau = \tau_h = 180$ с (в момент отключения горелки) температура воздуха принимает значения $T_a = 59$ °С и $T_a = 44$ °С при $r = 100$ мм и $r = 200$ мм. Эти значения температуры позволяют выполнить оценку максимального горизонтального градиента температуры воздуха на расстоянии $y = 50$ мм от поверхности листа: $\partial T_a / \partial r \approx -150$ °С/м.

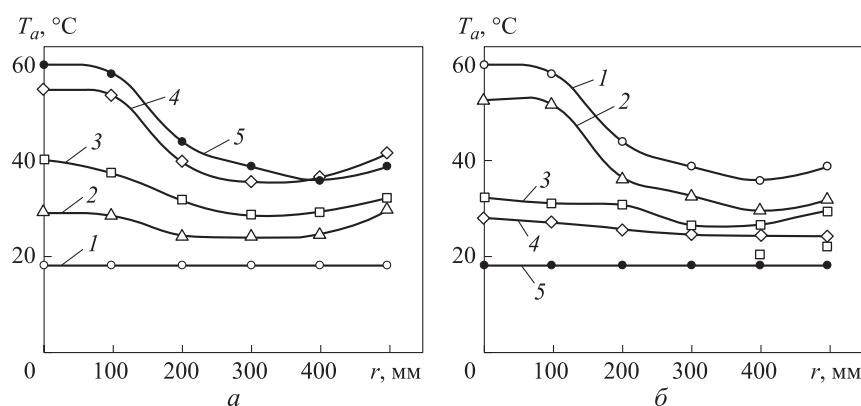


Рис. 3. Распределения температуры воздуха для различных моментов времени (режим № 6, $y = 50$ мм):

a — при нагреве (1 — $\tau_h = 0$ с; 2 — $\tau_h = 30$ с; 3 — $\tau_h = 60$ с; 4 — $\tau_h = 120$ с; 5 — $\tau_h = 180$ с); *б* — при охлаждении (1 — $\tau_c = 0$ с; 2 — $\tau_c = 60$ с; 3 — $\tau_c = 180$ с; 4 — $\tau_c = 300$ с; 5 — $\tau_c = 1200$ с)

Проведенные измерения показали, что распределение температуры воздуха по вертикали неоднородно. При работе на «мягких» режимах ($P = 2$ кВт) распределение температуры воздуха по вертикали также было неоднородным, однако значения температуры и реализуемые градиенты значительно ниже, чем при режиме № 6 (рис. 4, область 1).

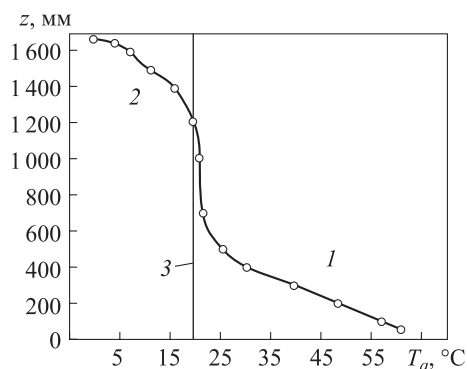


Рис. 4. Распределение температуры воздуха по высоте (режим № 6, $\tau_h = 180$ с, $r = 0$):

1 — область нагретого воздуха; 2 — область охлажденного воздуха; 3 — комнатная температура; $z = 0$ — уровень подстилающей поверхности; $z = 1700$ мм — уровень расположения сетки со льдом

Использование сухого льда позволяло охлаждать воздух до температуры $3...5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на расстоянии 50 мм под сеткой (см. рис. 4, область 2). Конструкция установки давала возможность изменять расстояние между подстилающей поверхностью и горизонтальной сеткой, на которой располагались цилиндрики льда (см. рис. 1). Эксперименты проводились для трех различных расстояний — 1100, 1400 и 1700 мм. Очевидно, что значение вертикального градиента температуры воздуха было максимальным при минимальном расстоянии между подстилающей поверхностью и сеткой. Однако добиться устойчивой генерации концентрированных вихревых структур при малых расстояниях (1100 и 1400 мм) не удалось. Тем не менее при максимальном расстоянии между поверхностью стола и сеткой (1700 мм) наблюдалась резкая интенсификация процесса генерации воздушных концентрированных вихрей по сравнению со случаем, когда температура воздуха изменялась путем его нагрева газовой горелкой снизу [14].

Интенсификация процесса генерации проявлялась в увеличении среднего числа наблюдаемых вихревых структур за один эксперимент, а также в росте интенсивности (характерной скорости, геометрии) и времени жизни воздушных вихрей (рис. 5). Так, при работе на «мягких» режимах (№ 2 и 3) с тепловой мощностью горелки $P = 2\text{ кВт}$ в условиях дополнительного охлаждения воздуха сверху зафиксирована стабильная генерация вихревых структур, превосходивших по интенсивности и времени жизни вихри, полученные при работе на «жестком» режиме № 6 при $P = 3,5\text{ кВт}$ [14].

Два выборочных кадра видеосъемки одного концентрированного воздушного вихря в различные моменты времени, отсчитываемые от момента зарождения вихря (начала срыва и уноса частиц магнезии с подстилающей поверхности), приведены на рис. 6. Полученные кадры позволили провести качественный анализ пространственно-временной структуры нестационарных вихревых образований, наблюдаемых в эксперименте.

Следует отметить, что в отсутствие вихревой структуры нисходящий поток холодного воздуха, визуализируемый продуктами сублимации льда, является крайне слабым и практически невидимым (рис. 6, а). Это происходит по двум причинам. Во-первых, холодный воздух оттесняется восходящими конвективными потоками теплого воздуха. Во-вторых, продукты сублимации льда интен-

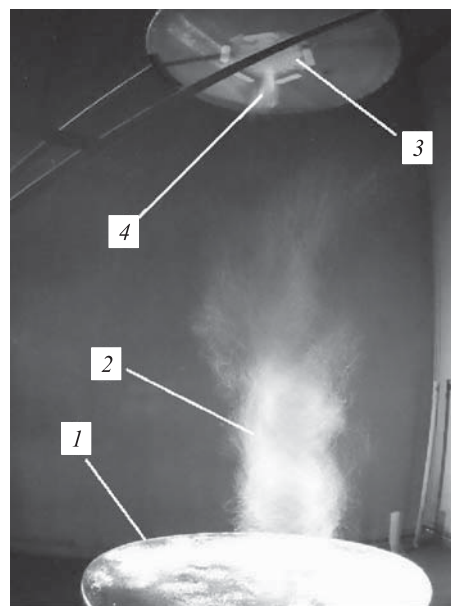


Рис. 5. Генерация концентрированных воздушных вихрей при переменных вертикальных градиентах температуры:

1 — край подстилающей поверхности; 2 — концентрированный воздушный вихрь; 3 — место расположения льда; 4 — нисходящий поток холодного воздуха

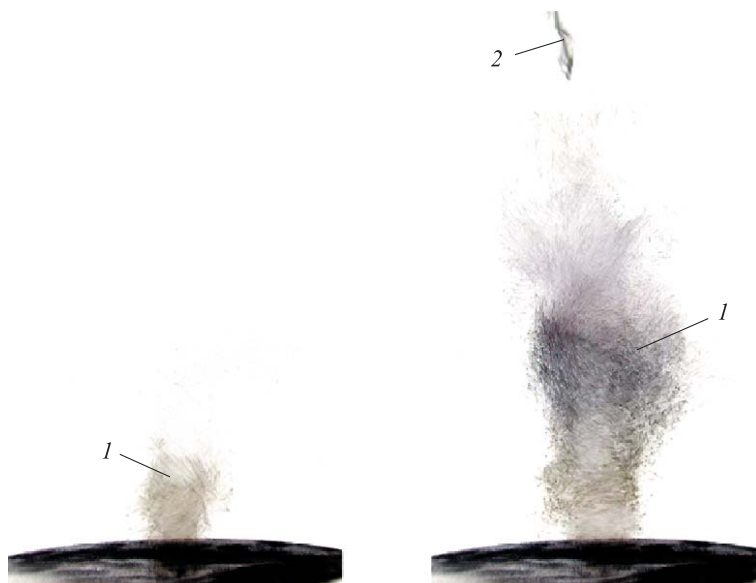


Рис. 6. Кадры видеосъемки одного концентрированного воздушного вихря в моменты времени (негатив) 0,5 (а) и 2,5 (б) с:

1, 2 — вихри, развивающиеся снизу от подстилающей поверхности и сверху от сетки

сивно испаряются, перемещаясь вниз в окружении теплого воздуха, что снижает их видимость.

В случае возникновения вихревой структуры и ее развития картина меняется. В процессе жизненного цикла воздушного вихря в его центральной области формируется область пониженного давления, в которую устремляются порции находящегося сверху относительно холодного воздуха. Это приводит к появлению на кадрах в верхней части хорошо различимых продуктов сублимации льда, визуализирующих нисходящее движение холодного воздуха. Особенно показательным является кадр, приведенный на рис. 6, б, на котором отчетливо виден «шнур» продуктов сублимации сухого льда, направленный вниз и ориентированный соосно растущему снизу воздушному вихрю. Указанный «шнур» представляет собой вихревую структуру (это хорошо заметно при увеличении изображения).

Предпринятая попытка интенсификации процессов вихреобразования за счет организации двух встречных («вкручивающихся» один в другой) вихрей требует дополнительных исследований.

Заключение. Изучены особенности процесса генерации свободных концентрированных воздушных вихрей при переменных вертикальных градиентах температуры воздуха по высоте. Полученные результаты позволяют сделать вывод об интенсификации процесса вихреобразования с увеличением степени температурной стратификации воздуха путем одновременного нагрева подстилающей поверхности снизу и охлаждения воздуха сверху.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L.* Theory of concentrated vortices: An introduction. Berlin: Springer, 2007. 494 p.
2. *Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* Tornado. New York: Begell House, 2015. 394 p.
3. *Davies-Jones R.* A review of supercell and tornado dynamics // *Atmospheric Research*. 2015. Vol. 148–149. P. 274–291. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.04.007
4. *Refan M., Hangan H., Wurman J., Kosiba K.* Doppler radar-derived wind field of five tornado events with application to engineering simulations // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 148. P. 509–521. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.068
5. *Panesar N.K., Innes D.E., Tiwari S.K., Low B.C.* A solar tornado triggered by flares // *Astronomy and Astrophysics*. 2013. Vol. 549. Paper A105.
6. *Are giant tornadoes the legs of solar prominences?* / S. Wedemeyer, E. Scullion, L.R. van der Voort, A. Bosnjak, P. Antolin // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 774. No. 2. P. 15. DOI: 10.1088/0004-637X/774/2/123
7. *Solar magnetized tornadoes: Rotational motion in a tornado-like prominence* / Y. Su, P. Gömöry, A. Veronig, M. Temmer, T.J. Wang, K. Vanninathan, W. Gan, Y.P. Li // *Astrophysical Journal Letters*. 2014. Vol. 785. No. 1. P. 6. DOI: 10.1088/2041-8205/785/1/L2
8. *Levens P.J., Labrosse N., Fletcher L., Schmieder B.* A Solar Tornado Observed by EIS plasma diagnostics // *Astronomy and Astrophysics*. 2015. Vol. 582. Paper A27.
9. *Ward N.B.* The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model // *J. Atmospheric Sciences*. 1972. Vol. 29. No. 9. P. 1194–1204.
10. *Haan F.L. Jr., Sarkar P.P., Gallus W.A.* Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Iss. 4. P. 1146–1159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.010
11. *Case J., Sarkar P., Sritharan S.* Effect of low-rise building geometry on tornado-induced loads // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. Vol. 133. P. 124–134. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.02.001
12. *Noda M., Ninomiya M., Nagao F.* Development of a new tornado simulator with multi-fan and multi-vane // *Journal of Wind Engineering*. 2014. Vol. 39. No. 1. P. 13–16.
13. *Wang J., Cao S., Pang W., Cao J.* Experimental study on effects of ground roughness on flow characteristics of tornado-like vortices // *Boundary-Layer Meteorology*. 2017. Vol. 162. Iss. 2. P. 319–339. DOI: 10.1007/s10546-016-0201-6
14. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A.* Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2012. Vol. 55. Iss. 23-24. P. 6567–6572. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.063
15. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. Vol. 64. P. 817–828. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008
16. *Dermer P.B., Varaksin A.Y., Leontiev A.I.* The wall-free non-stationary fire whirls generation by axisymmetric burning of solid fuel pellets // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 110. P. 890–897. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.076

Дермер Павел Борисович — начальник управления информационной и молодежной политики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Вараксин Алексей Юрьевич — д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), заведующий отделом, Объединенный институт высоких температур РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дермер П.Б., Вараксин А.Ю. Анализ процесса генерации воздушных вихрей при различных режимах нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 1. С. 84–94. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-84-94

ANALYSIS OF AIR VORTICES GENERATION PROCESS UNDER DIFFERENT HEATING CONDITIONS

P.B. Dermer¹

dermer@bmstu.ru

A.Yu. Varaksin^{1,2}

varaksin_a@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the study was to investigate the possibility of intensifying the process of wall-free concentrated air vortices generation by increasing the temperature instability of air. There exists a fundamental possibility of wall-free non-stationary thermal vortices generation without using mechanical twisting devices. Vortices generation was carried out over the underlying surface, namely aluminum sheet, by producing the unstable stratification of air heated from below. A simple experimental setup has been made, which makes it possible to change the air temperature gradient in the vertical direction. A series of experiments were performed in making the temperature stratification by simultaneously heating the air from below and cooling it from above. The air was heated by the controlled heating of the underlying surface using a gas burner. The air was cooled by means of dry ice located above the underlying surface. The dynamics of the vortices and their integral parameters (visible height, diameter) were determined by video recording. Single-frame analysis of this video recording made it possible to conduct a qualitative examination of the spatio-temporal structure of non-stationary vortex formations. The experiments carried out allowed us to make a conclusion concerning the intensi-

Keywords

Wall-free air vortices, concentrated vortices, vortices generation, unstable stratification, cooling from above, heating from below

fication of the vortex formation process with an increase in the vertical air temperature gradient. This effect appeared as an increase in the average number of the observed vortices per experiment, as well as in the growth of their intensity, namely characteristic velocity, geometry and stability, namely lifetime

Received 16.08.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L. Theory of concentrated vortices: An introduction. Berlin, Springer, 2007. 494 p.
- [2] Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Tornado. New York, Begell House, 2015. 394 p.
- [3] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. *Atmospheric Research*, 2015, vol. 148-149, pp. 274–291. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.04.007
- [4] Refan M., Hangan H., Wurman J., Kosiba K. Doppler radar-derived wind field of five tornado events with application to engineering simulations. *Engineering Structures*, 2017, vol. 148, pp. 509–521. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.068
- [5] Panesar N.K., Innes D.E., Tiwari S.K., Low B.C. A solar tornado triggered by flares. *Astronomy and Astrophysics*, 2013, vol. 549, paper A105.
- [6] Wedemeyer S., Scullion E., van der Voort L.R., Bosnjak A., Antolin P. Are giant tornadoes the legs of solar prominences? *Astrophysical Journal*, 2013, vol. 774, no. 2, p. 15. DOI: 10.1088/0004-637X/774/2/123
- [7] Su Y., Gömöry P., Veronig A., Temmer M., Wang T.J., Vanninathan K., Gan W.Q., Li Y.P. Solar magnetized tornadoes: Rotational motion in a tornado-like prominence. *Astrophysical Journal Letters*, 2014, vol. 785, no. 1, p. 6. DOI: 10.1088/2041-8205/785/1/L2
- [8] Levens P.J., Labrosse N., Fletcher L., Schmieder B. A solar tornado observed by EIS plasma diagnostics. *Astronomy and Astrophysics*, 2015, vol. 582, paper A27.
- [9] Ward N.B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model. *J. Atmospheric Sciences*, 1972, vol. 29, no. 9, pp. 1194–1204.
- [10] Haan F.L., Sarkar P.P., Gallus W.A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. *Engineering Structures*, 2008, vol. 30, iss. 4, pp. 1146–1159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.010
- [11] Case J., Sarkar P., Sritharan S. Effect of low-rise building geometry on tornado-induced loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, vol. 133, pp. 124–134. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.02.001
- [12] Noda M., Ninomiya M., Nagao F. Development of a new tornado simulator with multi-fan and multi-vane. *Journal of Wind Engineering*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 13–16.
- [13] Wang J., Cao S., Pang W., Cao J. Experimental study on effects of ground roughness on flow characteristics of tornado-like vortices. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, vol. 162, iss. 2, pp. 319–339. DOI: 10.1007/s10546-016-0201-6
- [14] Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2012, vol. 55, iss. 23-24, pp. 6567–6572. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.063
- [15] Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 817–828. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.008

[16] Dermer P.B., Varaksin A.Y., Leontiev A.I. The wall-free non-stationary fire whirls generation by axisymmetric burning of solid fuel pellets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 890–897. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.076


Dermer P.B. — Head of Information and Youth Policy, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Varaksin A.Yu. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Head of Department of Gas Turbine Power Plants and Renewable Energy, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation), Head of department, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Dermer P.B., Varaksin A.Yu. Analysis of Air Vortices Generation Process under Different Heating Conditions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 1, pp. 84–94 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-84-94



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник (5-е издание)
под редакцией **К.С. Колесникова, В.В. Дубинина**

«Курс теоретической механики»

Изложены кинематика, статика, динамика точки, твердого тела и механической системы; аналитическая механика; теория колебаний; теория удара; введение в динамику тел переменной массы; основы небесной механики. Приведены примеры решения задач. Содержание учебника соответствует программе и курсу лекций, которые читаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для студентов машиностроительных вузов и технических университетов. Может быть полезен аспирантам и преподавателям, а также специалистам в области статике и динамики механических систем.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru