

Общероссийский математический портал

А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, С. И. Таекин, Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 269–273

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

25 января 2025 г., 09:49:59



УДК 532.529

## ПАРАМЕТРЫ НЕУСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОЗДУХА, ПРИВОДЯЩЕЙ К ГЕНЕРАЦИИ СВОБОДНЫХ ВИХРЕЙ

© 2010 г. А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаш, В. Н. Копейцев, С. И. Таекин

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

Поступила в редакцию 03.04.2008 г.

Исследованы тепловые режимы нагрева (охлаждения) подстилающей поверхности, а также пространственно-временное поле температур воздуха, при которых неустойчивая стратификация приводит к образованию свободных вихрей.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение свободных (неограниченных стенками) вихрей, получаемых без искусственной закрутки воздушной среды, представляет собой актуальную проблему благодаря их широкому распространению в природе [1]. Примерами здесь могут служить атмосферные циклоны, песчаные и снежные бури, воздушные смерчи и т.п.

Указанные выше природные явления, происходящие в земной атмосфере, в значительной мере определяются характеристиками свободноконвективных потоков воздуха. Процесс свободной конвекции определяется уровнем температуры воздуха, скоростью ее повышения вблизи поверхности земли, а также величиной горизонтальных и вертикальных градиентов температур.

Температура воздуха вблизи земли зависит от свойств подстилающей поверхности (над асфальтовой дорогой температура может быть на 5 и более градусов выше, чем над близлежащим лугом) [2]. Скорость изменения температуры над травяным покровом, песком в пустыне или поверхностью моря утром, днем или вечером будут сильно различаться. Что касается горизонтальных и вертикальных градиентов температуры, то они будут определяться свойствами подстилающей поверхности, наличием на ней неоднородностей, а также интенсивностью различных процессов (вязкость, радиация и др.).

Настоящая работа является продолжением исследований [3, 4], в которых была продемонстрирована принципиальная возможность генерации и изучения свободных воздушных вихрей путем создания неустойчивой стратификации воздуха вследствие нагрева подстилающей поверхности. В работе [3] были исследованы тепловые режимы нагрева (охлаждения) подстилающей поверхности, при которых происходит образование вихрей, а также произведена оценка их интегральных параметров (геометрические размеры, время жизни,

скорость перемещения и др.) с использованием видеосъемки. В [4] выявлены различные типы траекторий перемещения основания вихревых структур и проведен анализ параметров (температура подстилающей поверхности, область возникновения, время жизни, направление движения и др.), определяющих вид траектории основания вихрей.

Цель данного исследования — получение и анализ пространственно-временного поля температур воздуха, приводящего к формированию вихревых структур. Знание распределений температуры воздуха позволит определить значения безразмерных критериев, характеризующих степень неустойчивости (сильная, слабая) стратификации, и использовать результаты отдельных экспериментов для оценки реальной синоптической ситуации [5–7], складывающейся в атмосфере Земли.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема рабочего участка, параметры тепловых режимов и последовательность проведения экспериментов подробно описаны в работе [3]. Используемая экспериментальная установка позволяет осуществлять контролируемый нагрев газовой горелкой (тепловая мощность — 3.5 кВт) подстилающей поверхности алюминиевого листа (марка Д16АМ, диаметр — 1100 мм, толщина — 1.5 мм), приводящий к генерации нестационарных вихревых образований вследствие создания неустойчивой стратификации воздуха.

Эксперименты проводились в шести различных тепловых режимах (см. таблицу), характеризующихся своими временами нагрева ( $\tau_h$ ), временами охлаждения ( $\tau_c$ ) и максимальной температурой в центре подстилающей поверхности ( $T_{cmax}$ ). “Мягкие” режимы (№№ 1–3), при которых достигались относительно невысокие температуры

## Основные характеристики опытных режимов

№ п/п	Режим нагрева	Время нагрева $\tau_h$ , с	Время охлаждения $\tau_c$ , с	Максимальная температура $T_{c\max}$ , К
1	слабый	60	600	420
2		120	900	470
3		180	1200	500
4	сильный	60	600	500
5		120	900	580
6		180	1200	610

поверхности алюминиевого листа, реализовывались при низких темпах нагрева. Более “жесткие” режимы (№№ 4–6) характеризуются более высокими температурами подстилающей поверхности, которые достигаются при больших значениях теплового потока. Устойчивая генерация вихрей наблюдалась при всех режимах за исключением режима № 1 [3].

Приводимые ниже результаты измерений пространственно-временного поля температур воздуха были получены при работе в режимах № 6 и № 1.

Измерения температуры алюминиевого листа (подстилающей поверхности) осуществлялись инфракрасным термометром (модель AZ8868, Тайвань). Измерения температуры воздуха над подстилающей поверхностью проводились с использованием хромель-алюмелевых термопар. Фотосъемка генерируемых вихревых структур осуществлялась фотокамерой (модель Casio Exilim EX-S500, Китай).

Для визуализации образуемых вихревых образований использовался дым, получаемый при ки-

пении специальной жидкости (VDLSL5, фирма Velleman, Бельгия), которая наносилась на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов. Типичная фотография наблюдаемых (с помощью дымовой визуализации) в эксперименте воздушных вихрей приведена на рис. 1а. На рис. 1б показана для сравнения фотография реального воздушного смерча в штате Аризона (США).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приводятся и анализируются результаты измерений температуры поверхности алюминиевого листа и пространственно-временного поля температур воздуха. Измерения температуры воздуха (вдоль радиуса) проводились в шести точках с координатами  $r = 0, 100, 200, 300, 400$  и  $500$  мм ( $r$  – расстояние от центра листа по горизонтали) на различных расстояниях от поверхности листа  $y = 50, 100, 200$  и  $300$  мм ( $y$  – расстояние от центра листа по вертикали).

На рис. 2 приведены зависимости температуры в центре поверхности листа от времени  $T_c = T_c(\tau)$  и температуры воздуха  $T_a = T_a(\tau)$  на расстоянии  $y = 50$  мм от центра подстилающей поверхности для режима № 6. Из приведенных данных видно, что температура воздуха значительно ниже температуры поверхности листа. Максимальное значение температуры воздуха равно  $T_a = 334$  К при  $\tau_h = 180$  с.

Распределения температуры воздуха по радиусу подстилающей поверхности  $T_a = T_a(r, \tau)$  на расстоянии  $y = 50$  мм от нее при нагреве и охлажде-

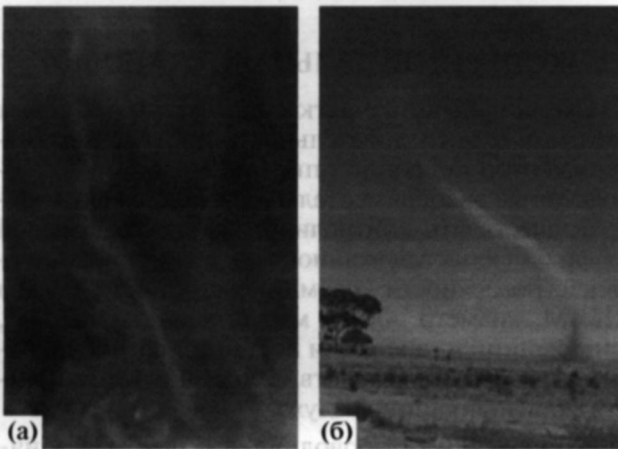


Рис. 1. Фотографии вихревых структур: (а) – типичный кадр с зафиксированным свободным вихрем, размер изображения –  $0.30 \times 0.45$  м; (б) – воздушный смерч в штате Аризона (США), фотография космического агентства NASA.

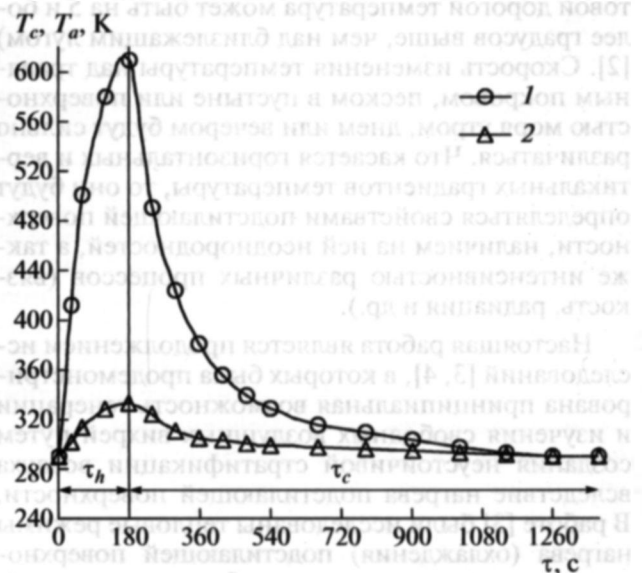


Рис. 2. Зависимости температуры подстилающей поверхности и воздуха ( $y = 50$  мм) от времени (режим № 6),  $r = 0$ : 1 – поверхность, 2 – воздух.

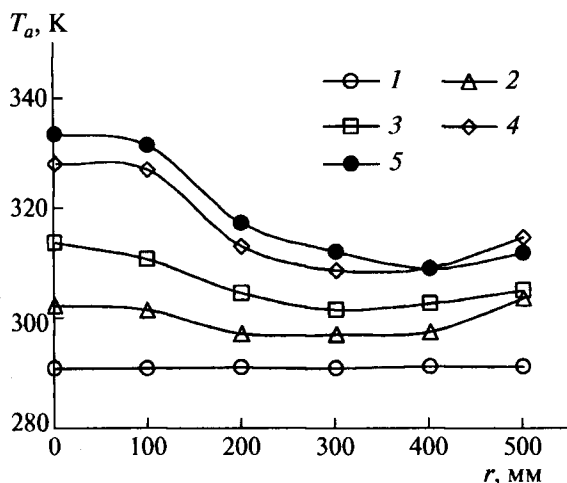


Рис. 3. Зависимости температуры воздуха от радиуса подстилающей поверхности и времени при нагреве (режим № 6),  $y = 50$  мм: 1 –  $\tau_h = 0$ , 2 – 30 с, 3 – 60 с, 4 – 120 с, 5 – 180 с.

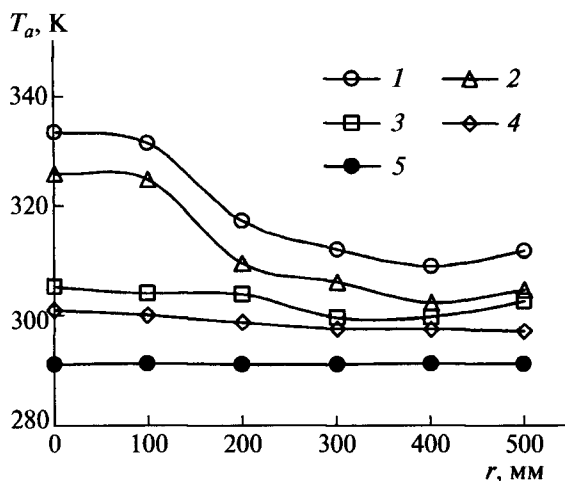


Рис. 4. Зависимости температуры воздуха от радиуса подстилающей поверхности и времени при охлаждении (режим № 6),  $y = 50$  мм: 1 –  $\tau_c = 0$ , 2 – 60 с, 3 – 180 с, 4 – 300 с, 5 – 1200 с.

нии для режима № 6 показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Отчетливо видно, что распределение температуры воздуха неоднородно; максимальные градиенты температуры воздуха реализуются в кольцевой области ( $150 \text{ мм} < r < 250 \text{ мм}$ ), там же, где реализуются и максимальные градиенты температуры подстилающей поверхности [3, 4]. В указанной области преимущественным образом и происходила генерация вихревых структур. Некоторое повышение температуры в периферийной области подстилающей поверхности ( $r > 400 \text{ мм}$ ) объясняется, по-видимому, наличием восходящих потоков теплого воздуха из-под листа вследствие работы газовой горелки. При  $\tau = \tau_h = 180 \text{ с}$  (в момент отключения горелки) температура воздуха принимает значения  $T_a = 332 \text{ К}$  и  $T_a = 317 \text{ К}$  при  $r = 100 \text{ мм}$  и  $r = 200 \text{ мм}$  соответственно. Данные значения температур позволяют сделать оценку максимального горизонтального градиента температуры воздуха на расстоянии  $y = 50 \text{ мм}$  от поверхности листа:  $\partial T_a / \partial r \approx -150 \text{ К/м}$ .

На рис. 5 приведены зависимости температуры воздуха от расстояния по вертикали до центра подстилающей поверхности и времени  $T_a = T_a(y, \tau)$  (режим № 6). Из приведенных данных видно, что распределение температуры воздуха по вертикали неоднородно. При  $\tau = \tau_h = 180 \text{ с}$  (в момент отключения горелки) температура воздуха принимает значения  $T_a = 334, 330, 321, 313 \text{ К}$  при  $y = 50, 100, 200, 300 \text{ мм}$  соответственно. Указанные данные позволяют сделать вывод о практически линейном уменьшении температуры с высотой в исследованном диапазоне расстояний от листа и постоянстве вертикального градиента температу-

ры воздуха, а также произвести его оценку:  $\partial T_a / \partial y \approx -80 \text{ К/м}$ .

На рис. 6 приведены зависимости температуры в центре поверхности листа от времени  $T_c = T_c(\tau)$  и температуры воздуха  $T_a = T_a(\tau)$  на расстоянии  $y = 50 \text{ мм}$  от центра подстилающей поверхности для самого “мягкого” режима № 1. При работе в этом режиме генерация вихревых структур не наблюдалась. Максимальное значение температуры воздуха равно  $T_a = 300 \text{ К}$  при  $\tau_h = 60 \text{ с}$ , что значи-

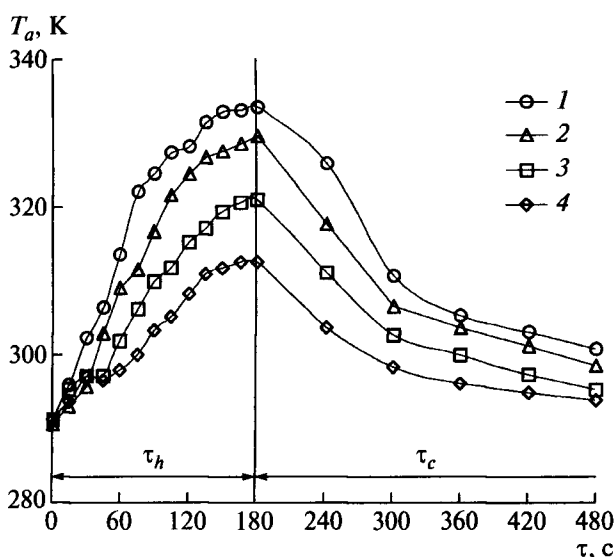


Рис. 5. Зависимости температуры воздуха от расстояния до подстилающей поверхности и времени (режим № 6),  $r = 0$ : 1 –  $y = 50 \text{ мм}$ , 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300.

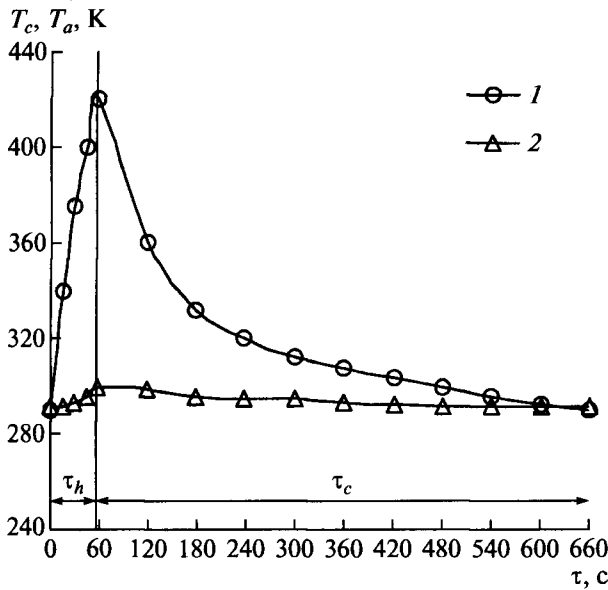


Рис. 6. Зависимости температуры подстилающей поверхности и воздуха ( $y = 50$  мм) от времени (режим № 1),  $r = 0$ : 1 – поверхность, 2 – воздух.

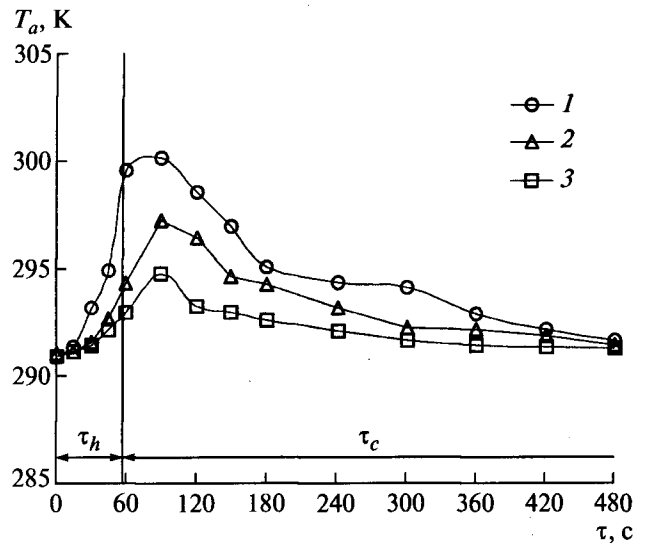


Рис. 7. Зависимости температуры воздуха от расстояния до подстилающей поверхности и времени (режим № 1),  $r = 0$ : 1 –  $y = 50$  мм, 2 – 100, 3 – 200.

тельно ниже, чем при работе в режиме № 6 (см. выше).

Распределения температуры воздуха на различных расстояниях от центра подстилающей поверхности от времени  $T_a = T_a(y, \tau)$  для режима № 1 приведены на рис. 7. Из приведенных данных видно, что распределение температуры воздуха по вертикали неоднородно, однако реализуемые градиенты ниже, чем при режиме № 6.

Полученные распределения температуры воздуха позволили сделать оценку величины безразмерного теплового критерия – числа Рэлея, определяющего соотношение между силами плавучести и вязкости, для различных тепловых режимов. Данный критерий определялся следующим образом:

$$Ra = \frac{gh^3\beta\Delta T}{\nu a}$$

Здесь  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – характерный размер по вертикали, на котором имеется разница температур;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $\Delta T$  – разница температур, вызывающая конвекцию;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $a$  – коэффициент теплопроводности.

Для выполнения оценок в качестве  $h$  принималось расстояние по вертикали от подстилающей поверхности до значения  $y$ , при котором температура воздуха лишь на 10 К превышает аналогичное значение в окружающей среде. Коэффициенты объемного расширения, кинематиче-

ской вязкости и теплопроводности  $\beta, \nu$  и  $a$  брались для параметров окружающего воздуха.

Полученные в результате оценок зависимости числа Рэлея от времени для различных тепловых режимов приведены на рис. 8. Эксперименты отчетливо показали, что устойчивая генерация вихрей наблюдалась при всех режимах за исключением режима № 1 [3]. Следовательно, число Рэлея  $Ra \approx 10^7$  может быть принято за некоторое мини-

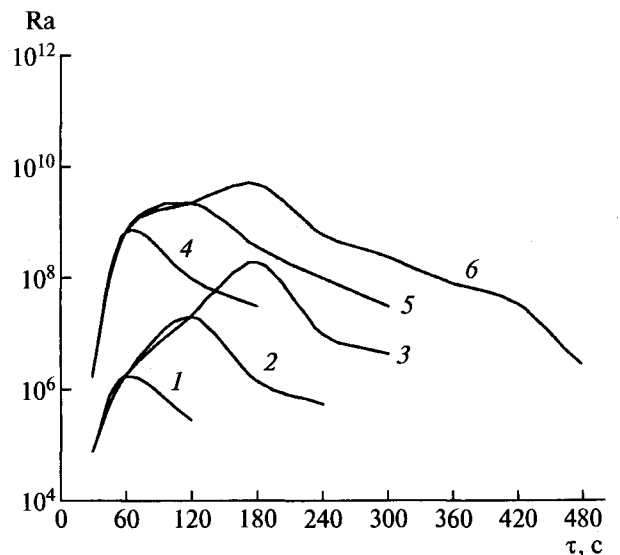


Рис. 8. Зависимости числа Рэлея от времени для различных тепловых режимов ( $r = 0$ ): 1 – режим № 1, 2 – № 2, 3 – № 3, 4 – № 4, 5 – № 5, 6 – № 6.

мальное значение, при котором начинается образование вихрей. Самые крупные вихри генерировались при работе в режимах № 5 и № 6 [3], что соответствует  $Ra \geq 10^9$ . На рис. 8 приведены две горизонтальные линии, соответствующие числам Рэлея:  $Ra = 10^7$  и  $Ra = 10^9$ . С их помощью можно определить временные диапазоны существования относительно мелких ( $10^7 < Ra < 10^9$ ) и крупных ( $Ra > 10^9$ ) вихревых структур для различных тепловых режимов. Полученные диапазоны хорошо согласуются с данными экспериментов по генерации вихрей в режимах нагрева, а также охлаждения подстилающей поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения пространственно-временных полей температуры воздуха над подстилающей поверхностью, обогреваемой снизу. Полученные данные позволяют оценить темпы нагрева воздуха, величины горизонтальных и вертикальных градиентов температур, при которых неустойчивая стратификация воздуха приводит к образованию свободных вихрей.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН "Исследование фундаментальных проблем и разработка математических моде-

лей газовой динамики, теплообмена и горения газозобразных и конденсированных сред", Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00743) и гранта Президента РФ (МД-4995.2007.8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969. 487 с.
2. *Скореп Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 552 с.
3. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И.* О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях // ТВТ. 2008. Т. 46. № 6. С. 957.
4. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Таекин С.И., Копейцев В.Н.* Генерация свободных концентрированных воздушных вихрей в лабораторных условиях // ТВТ. 2009. Т. 47. № 1. С. 84.
5. *Chalmers A.* Synoptic and Mesoscale Environments in Tropical Tornado Outbreaks // Bull. American Meteor. Soc. 2007. V. 88. № 10. P. 1536.
6. *Brooks H.E., Doswell C.A., Kay M.P.* Climatological Estimates of Local Daily Tornado Probability for the United States // Weather and Forecasting. 2003. V. 18. № 4. P. 626.
7. *Feuerstein B., Dotzek N., Grieser J. et al.* Assessing a Tornado Climatology from Global Tornado Intensity Distributions // J. Climate. 2005. V. 18. № 4. P. 585.