

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2009 г.**

**ВЫП. II
ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2010

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СМЕРЧА

Ю.А. РУДИ

В лабораторных условиях сформирован тепловой смерч. Предложена аналитическая формула для определения высоты теплового смерча и проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL TORNADO

YU.A. RUDI

This work presents physical modeling of thermal tornado in laboratory conditions. Was proposed an analytical formula for determining the height of the thermal tornado and a comparison of theoretical and experimental data.

В общем случае закрутка потока приводит к интенсификации турбулентности, увеличению скорости перемешивания и получению более короткой и стабильной тепловой колонки. Однако в определенных условиях закрутка может приводить к ламинаризации и получению более длинной вращающейся тепловой колонки (теплового смерча).

Целью работы является физическое и математическое моделирование тепловых смерчей, возникающих в результате вращения нагретого диска в первоначально неподвижной среде.

Исследование тепловых смерчей осуществлялось в лабораторных условиях с помощью экспериментальной установки, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением нижнего основания. На рис. 1 показано устройство такой установки.

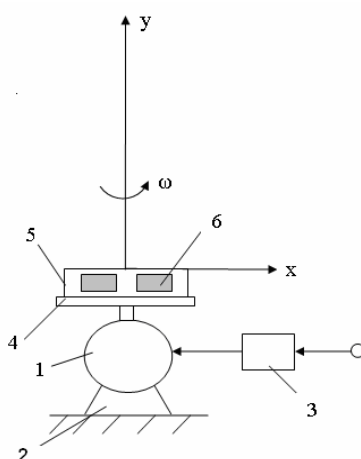


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для моделирования теплового смерча закруткой снизу

Она состоит из электродвигателя – 1, основания – 2, регулятора напряжения – 3, круглого диска – 4 с закрепленным на нем источником тепла, выполненным в форме цилиндрического диска – 5. Внутри диска размещались электрические нагревательные элементы – 6. Частота вращения вала электродвигателя с диском и нагревателем задавалась с помощью регулятора напряжения и варьировалась в пределах $\omega = (0 \div 1,8)$ Гц.

В процессе проведения экспериментов измерялись: профили скорости w вдоль координаты y с помощью крыльчатого анемометра и температуры T термоэлектрическим методом с использованием хромель-алюмелевой термопары [1] с диаметром спая $2 \cdot 10^{-4}$ м; плотность теплового потока q экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока с теплоизолированным чувствительным элементом из материала с высоким значением коэффициента удельной теплопроводности (из меди); контролировалась угловая скорость вращения основания с источником тепла.

Датчики для измерений T , q , w жестко крепились к штативу и помещались в рабочую часть теплового смерча. Время регистрации параметров струи в контрольной точке составляло $(10 \div 15)$ с. Суммарные погрешности определения параметров не превышали. $\delta T \leq 5\%$; $\delta w \leq 9\%$; $\delta q \leq 10\%$. В процессе экспериментов рассматривался вопрос о поведении и формировании теплового смерча, а также изменении его геометрических размеров.

Визуализация газодинамической картины течения газа в тепловом смерче, результаты измерения термогазодинамических параметров и их анализ позволяют сформулировать механизм формирования и эволюции тепловых смерчей.

Формированию смерча предшествует появление конвективной колонки, образованной источником тепла. Ее интенсивность зависит от величины плотности теплового потока q . Закрутка газового потока приводит к появлению центробежных сил, стремящихся увеличить ширину конвективной колонки, однако этого не происходит из-за уравнивания действия центробежных сил градиентом давления, направленным в приосевую зону смерча. Влияние градиента давления будет определяться степенью нагретости газа в центре, уменьшением его плотности и, в конечном итоге, значением плотности теплового потока от источника. Этот процесс сопровождается увеличением высоты факела в несколько раз.

При моделировании теплового смерча была выяснена минимальная частота закрутки основания ω . Смерч появлялся при $\omega = 0,7$ Гц, однако был неустойчив. Во всем диапазоне ω диаметр смерча менялся незначительно и составлял $(1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-2}$ м у основания, тогда как высота смерча при увеличении угловой скорости вращения основания возрастала от 30 см до 70 см. При увеличении ω до $\omega = 1,8$ Гц смерч также становился неустойчивым. В связи с этим дальнейшие измерения профилей температуры осуществлялись при частоте $\omega = 1,3$ Гц.

Анализ экспериментальных и теоретических исследований [2–5] позволяет сделать вывод, что определяющими для существования теплового смерча являются условия локального равновесия действующих сил. В предположении, что тепловая энергия, сообщаемая смерчу, полностью переходит в потенциальную энергию, для определения высоты теплового смерча может использоваться следующая формула:

$$h = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{\rho D^2} \right)^{2/3} \frac{T_*}{T_* - T_e}, \quad (1)$$

где Q – интенсивность нагрева воздушных масс вращающимся диском, которая согласно [4] может быть определена как

$$Q = (0,36 + 0,1 \text{Re}_\omega^{0,6}) \lambda D (T_* - T_e) \quad (2)$$

где $\text{Re}_\omega = \rho \omega \pi D^2 / 2\mu$ – число Рейнольдса вращательного движения.

Результаты расчетов по формуле (1) с использованием (2) дают завышенную оценку высоты теплового смерча, поскольку в этих формулах не учитываются теплопотери, связанные с нагревом окружающего воздуха. Поэтому формула (1) должна быть скорректирована, с учетом теплообмена. Тепловая энергия, расходуемая на подъем воздушных масс, может быть записана в виде

$$Q_* = f(\text{Re}_\omega)Q, \quad (3)$$

где $f(\text{Re}_\omega)$ – функция числа Рейнольдса вращательного движения, характеризующая теплопотери. Обработка результатов вычислений позволяет использовать следующую зависимость:

$$f(\text{Re}_\omega) = 0,06 \cdot \exp(-0,002 \text{Re}_\omega^{0,6}). \quad (4)$$

Окончательно формула для определения высоты теплового смерча принимает вид

$$h = \frac{1}{2g} \left(\frac{f(\text{Re}_\omega)Q}{\rho D^2} \right)^{2/3} \frac{T_*}{T_* - T_e}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлено сравнение результатов расчета высоты теплового смерча, согласно формуле (5) и экспериментальным данным.

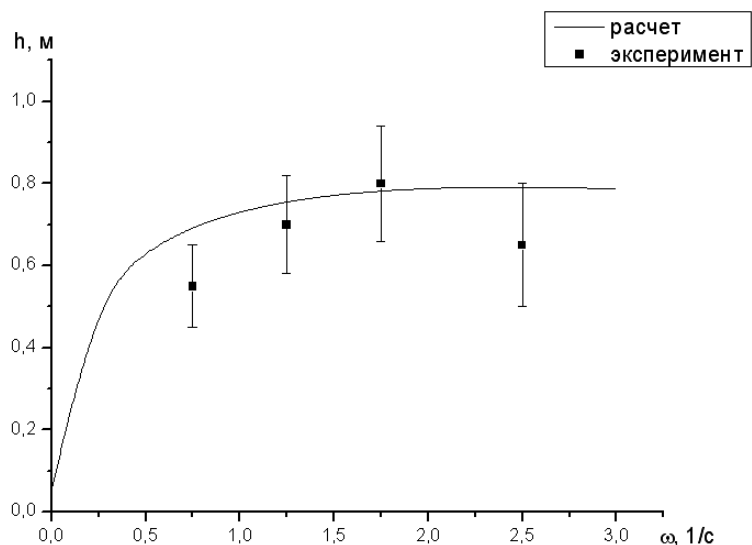


Рис. 2. Изменение высоты теплового смерча с закруткой.
Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Видно, что предложенная аналитическая зависимость качественно согласуется с данными лабораторных исследований. При этом в диапазоне закруток $\omega=(1,3 - 1,8)$ Гц, то есть в области устойчивого существования теплового смерча, экспериментальные и расчетные данные находятся в хорошем количественном соответствии. Надо отметить, что при более сильной закрутке предложенная аналитическая формула дает несколько завышенную высоту теплового смерча, что объясняется

неучетом дополнительных тепловых потерь, происходящих при распаде сильнозакрученной турбулентной струи.

Таким образом, формирование теплового смерча можно объяснить возникновением локального равновесия в свободно-вынужденном вихре, связанного с анизотропией турбулентности и ламинаризацией течения при умеренных закрутках потока, приводящей к ослаблению теплообмена с окружающим воздухом, а, следовательно, к росту силы Архимеда и к ускорению потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы. М., 1978.
2. *Бубнов Б.М.* Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33, № 4. С. 434–442.
3. *Popiel Cz.O., Boguslawski L.* Local Heat Transfer Coefficients on the Rotation Disc in Still Air // Int. Journal of Heat Mass Transfer. 1975. Vol. 18. P. 167–73.
4. *Никулин В.В.* Исследование взаимодействия торнадоподобного вихря с твердыми границами // ПМТФ. 1980. № 1. С. 68–75.
5. *Никулин В.В.* Аналог уравнений вихревой мелкой воды для полых и торнадоподобных вихрей. Высота стационарного торнадоподобного вихря // ПМТФ. 1992. № 2. С. 45–51.