

Визуализация смерчеобразных структур с целью совершенствования систем охлаждения электротехнических устройств

А.Ю. Вараксин^{1,А}, К.К. Деньщиков^{2,В}, М.В. Протасов^{3,В}, М.Э. Ромаш^{4,В}

^А Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия

^В Объединенный институт высоких температур РАН, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-9256-1491, kdenshchikov@mail.ru

³ ORCID: 0000-0003-0711-9437, protasov_m@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-3524-078X, romash_61@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена решению вопросов охлаждения электротехнических устройств и систем киловольтного и мегаваттного диапазона. Нестационарные вихри могут образовываться при обтекании конструктивных элементов и узлов электротехнических устройств. Визуализация и диагностика вихревых структур, возникающих при движении теплоносителей через каналы сложной геометрии, являются актуальными задачами.

Генерация смерчеобразных структур (нестационарных вихрей) осуществлялась над подстилающей поверхностью (лист алюминия) за счет создания неустойчивой стратификации воздуха при его нагреве снизу. Для визуализации генерируемых свободных нестационарных вихревых структур применялись микрометровые частицы магнезии, которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов.

Покадровый просмотр записей, получаемых путем прямой видеорегистрации на различных тепловых режимах, позволял проводить качественный анализ пространственно-временной структуры нестационарных вихрей и получать информацию о целом ряде их важных интегральных параметров (видимая высота, диаметр, время жизни, количество вихрей, скорость перемещения основания и др.).

Рассмотрены основы обработки изображений, получаемых методом анемометрии по изображениям частиц с использованием полевого измерителя скоростей ПОЛИС (Институт теплофизики СО РАН), для восстановления полей мгновенных скоростей вихревых структур.

Представлены результаты визуализации свободных нестационарных вихрей с помощью прямой видеосъемки и векторные поля мгновенных скоростей в поперечном сечении вихря, полученные путем использования метода анемометрии по изображениям частиц.

Разработанная методология визуализации и диагностики свободных нестационарных вихрей может быть использована при разработке и создании современных систем охлаждения высокоэнергетических электротехнических устройств.

Ключевые слова: визуализация, свободные нестационарные вихри, охлаждение электротехнических устройств, метод анемометрии по изображениям частиц, векторное поле скоростей.

1. Введение

Одной из самых актуальных задач при создании современных электротехнических устройств и систем является проблема отвода высоких тепловых потоков [1–3]. В системах киловольтного и мегаваттного диапазонов работы интенсивность тепловых потоков может достигать 100 Вт/см^2 (1 МВт/м^2). Перед конструкторами высокоэнергетических устройств современной электротехники, характеризующихся высокой плотностью монтажа и уменьшенными габаритами, стоит нетривиальная задача повышения эффективности охлаждения в условиях высокого гидравлического сопротивления и увеличения затрат энергии на прокачку теплоносителя. Предлагаются различные способы решения описанной проблемы: 1) интенсификация теплообмена путем использования турбулентных режимов течения охлаждающих газов; 2) использование диэлектрических жидкостей (например, Novac 649) [4], температура кипения которых ниже, чем температура поверхности тепловыделяющих элементов, и др.

Турбулентные течения характеризуются наличием вихревых структур различных масштабов. Отметим, что нестационарные вихри могут образовываться при обтекании конструктивных элементов и узлов электротехнических устройств. Таким образом, визуализация и диагностика вихревых структур, возникающих при движении теплоносителей через каналы сложной геометрии, является актуальной задачей.

Целью данной работы является визуализация свободных нестационарных вихрей с помощью прямой видеосъемки, а также измерение векторных полей мгновенных скоростей в поперечном сечении вихря с использованием метода анемометрии по изображениям частиц.

2. Экспериментальная установка для генерации свободных нестационарных вихрей

Генерация вихревых структур осуществлялась путем создания неустойчивой стратификации воздуха над подстилающей поверхностью алюминиевого листа (диаметр – 1100 мм, толщина – 1,5 мм), нагреваемого снизу газовой горелкой (максимальная тепловая мощность – 3,5 кВт). Схема используемой экспериментальной установки и режимы нагрева подробно описаны в работах [5, 6]. Для визуализации образуемых вихревых структур применялись микрометровые частицы магнезии (химическая формула – $4\text{MgCO}_2\text{Mg}(\text{OH})_{24}\text{H}_2\text{O}$, физическая плотность – 3900 кг/м^3), которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

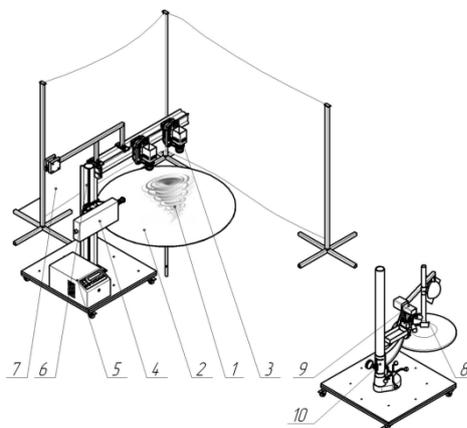


Рис. 1. Схема эксперимента по визуализации воздушных вихрей: 1 – свободный нестационарный вихрь; 2 – подстилающая поверхность; 3 – цифровая фотокамера; 4 – лазер; 5 – блок синхронизации; 6 – рама; 7 – фоновое полотно; 8 – стойка освещения; 9 – цифровая видеокамера; 10 – штатив

Для регистрации вихрей используются два метода. Первым методом является метод прямой видеорегистрации с использованием цифровой видеокамеры (модель Sanyo VCC-6572P, Япония). Вторым методом является метод анемометрии по изображениям частиц (PIV-метод в англоязычной литературе) с применением полевого измерителя скоростей «ПОЛИС» (ИТ СО РАН им. С.С.Кутателадзе).

3. Визуализация свободных нестационарных вихрей путем прямой видеорегистрации

При прямой видеорегистрации для подсветки используются несколько светодиодных прожекторов, что вследствие явления рассеяния света на частицах способствует лучшей визуализации свободного нестационарного воздушного вихря. Основной проблемой проводимых исследований является непредсказуемость места и времени генерации вихря. После возникновения вихрь также не находится на одном месте, а перемещается по случайной траектории. Структура вихря также является нестационарной.



Видеоролик 1. Видеорегистрация свободного нестационарного вихря

Покадровый анализ видеозаписей на различных тепловых режимах позволяет получать информацию о следующих параметрах процесса генерации вихрей и характеристиках последних: 1) значения температур, при которых происходит генерация вихрей; 2) область подстилающей поверхности, где происходит образование вихрей; 3) направление вращения вихревой структуры; 4) количество наблюдаемых вихрей за один эксперимент; 5) траектория перемещения основания вихревой структуры; 6) длина траектории основания вихря; 7) скорость перемещения основания вихря; 8) время жизни (существования) вихревой структуры; 9) видимая высота вихрей; 10) видимый диаметр вихрей и др.

В представленном видеоролике 1 периодически появляются частицы, подсвеченные зеленой лазерной плоскостью. Именно по этим частицам будет выполняться построение векторного поля по методу анемометрии по изображениям частиц.

4. Векторные поля мгновенных скоростей, получаемые методом анемометрии по изображениям частиц

Полевые измерения скорости, в основе которых лежит измерение перемещений взвешенных в потоке мелких частиц (трассеров), применяются уже в течение нескольких десятилетий. Применяемая ранее ручная обработка данных была чрезвычайно трудоемкой, и это не позволяло получать необходимое при решении физических задач количество и качество информации.

Метод анемометрии по изображениям частиц относится к классу оптических методов измерения скорости в однофазных [7–9] и двухфазных [10] потоках. В ряду других

инструментов для исследования структуры течений он занимает особое место благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов диагностики. Применение полевых методов дает возможность получения информации о динамике структур, их масштабах, расчета дифференциальных характеристик, пространственных и пространственно-временных корреляций, а также статистических характеристик потока [11–14].

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру).

Основы обработки изображений. Основным элементом метода анемометрии по изображениям частиц (PIV-метода) является обработка полученных изображений. Существует несколько модификаций цифровой трассерной визуализации, соответственно, для каждой из которых применяются различные методы обработки. Различают два типа корреляционных алгоритмов: автокорреляционный, когда на одном кадре записываются как начальные положения трассеров, так и конечные, и кросс-корреляционный, когда начальные и конечные положения трассеров регистрируются на различных кадрах. Использование кросс-корреляционных алгоритмов является предпочтительным (хотя и более ресурсоемким), поскольку в автокорреляционных алгоритмах начальные и конечные положения трассеров равнозначны, и, соответственно, их смещение определяется с точностью до знака. В этом случае необходимо привлекать априорные знания о структуре потока. Вся измерительная область разбивается на элементарные ячейки (расчетные области) размером $d_x \times d_y$. Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) можно представить функцией двух переменных x и y : $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ для первого и второго кадра соответственно. Далее вычисляется следующая корреляционная функция

$$\varphi_{I_1 I_2}(m, n) = \sum_{l=-d_y/2}^{d_y/2} \sum_{k=-d_x/2}^{d_x/2} I_1(k, l) \cdot I_2(k+m, l+n)$$

Максимум этой функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в элементарной измерительной области. При этом предполагается, что скорость потока в элементарной области однородна и все частицы совершают одинаковое перемещение.

Для более точного определения координат максимума корреляционной функции в его окрестности используется интерполяция корреляционной функции с подпиксельной точностью. Координатой максимума считается координата максимума интерполирующей функции. Вид интерполирующей функции является предметом совершенствования метода.

Большинство модификаций PIV-метода используют для расчета корреляционной функции стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для уменьшения эффектов конечности элементарного объема при преобразовании Фурье, как правило, используется стандартная техника наложения окон. Кроме того, использование окон уменьшает вклад в корреляционную функцию частиц, которые лежат близко к границам элементарной области. Такие частицы с большой вероятностью не присутствуют в

той же элементарной области на втором изображении (так называемый эффект «потери пары») и, следовательно, являются источником «корреляционных шумов».

Рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц D в данной элементарной области, можно вычислить скорость потока в точке, соответствующей центру элементарной измерительной области (Δt - заданная временная задержка между двумя освещающими вспышками) следующим образом

$$V = S \frac{D}{\Delta t},$$

где S - масштабный коэффициент. Выполняя указанные операции для каждой элементарной области, на которые разбито изображение (применяется как регулярное, так и нерегулярное разбиение), можно определить поле скорости для всей области.

Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

С целью детального изучения полей скоростей в концентрированных вихрях, использовался полевой измеритель скоростей «ПОЛИС» (ИТ СО РАН им. С.С.Кутателадзе). Указанное средство диагностики позволяет проводить измерения трехмерных полей мгновенных скоростей в существенно нестационарных потоках, имеющих сложную геометрию, с высоким пространственно-временным разрешением и малыми погрешностями. Система «ПОЛИС» включает в себя двойной импульсный Nd:YAG лазер (длина волны 532,05 нм, мощность импульса не менее $5 \cdot 10^6$ Вт, длительность импульса не более 5 нс, частота повторения импульсов 1-8 Гц); блок управления и блок питания лазера; две цифровые камеры 4 МРiх, имеющие формат изображения 2048×2048 (размер пикселя $7,4 \times 7,4$ мкм, размер ПЗС-матрицы $15,15 \times 15,15$ мм, кадровая частота 3,4 Гц, время экспозиции 120 мс); синхронизатор работы лазера и фотокамер. Измерения и обработка результатов проводились при помощи ПК с системой сбора и обработки данных, включающей в себя два контроллера камер и программный пакет ActualFlow, разработанный в ИТ СО РАН им. С.С.Кутателадзе.

Двойной импульсный лазер. Двойной импульсный лазер является источником импульсов когерентного света. Лазер предназначен для фиксации быстропротекающих процессов в среде, рассеивающей его излучение и регистрации изменений в среде за короткий промежуток времени. В лазере формируется два импульса когерентного света: большой ($5 \cdot 10^6$ Вт) интенсивности и малой (10^{-8} с) длительности. Импульсы излучаются с временной задержкой относительно друг друга. Величина задержки меняется в широких (10^{-7} – 10^{-1} с) пределах и контролируется с высокой (10^{-8}) точностью.

Лазер состоит из излучателя и системного блока. В излучателе расположены 2 лазерных резонатора, 2 квантора с активным веществом – Nd:YAG и лампой накачки, система сведения лучей, преобразователь частоты лазерного излучения и оптический аттенюатор. В системном блоке расположены: источник питания импульсных ламп накачки лазера, система охлаждения лазера и блок управления работой лазера. Излучатель и системный блок через разъем соединены между собой гибким рукавом, в котором размещены шланги системы охлаждения, кабели силового питания и сигнальные кабели.

Для регулировки толщины лазерного пучка использовалась оптическая насадка. Регулировка осуществлялась путем вращения кольца в центральной части насадки. Фактически вращение кольца изменяет фокусное расстояние оптической системы, которое меняется от 0,3 м до ∞ . При этом толщина лазерного ножа меняется от 0,5 мм до 3 мм. При больших расстояниях от излучателя лазера до измерительной области поперечный размер лазерного ножа становится еще больше за счет расходимости пучка. Изме-

рение толщины лазерного ножа проводилось путем экспозиции засвеченной фотобумаги.

Цифровые фотокамеры. Кросскорреляционные камеры являются устройствами регистрации изображений. Камеры предназначены для двукратной регистрации трассерных картин в потоке и могут работать как в двухкадровом режиме, так и в однокадровом режиме. Временная задержка между вспышками лазера при двухкадровом режиме регистрации кадров варьировалась от 10 мкс до 259 мс.

Фотокамеры устанавливались на координатные устройства, включающие в себя два поворотных механизма и один механизм для перемещения камеры относительно объектива (рис. 2). Первый поворотный координатный механизм используется для поворота главной оптической оси камеры. Данный угол должен выставляться таким образом, чтобы камера получала изображение с интересующей измерительной области. Положение координатного механизма фиксируется винтом на нижнем лимбе. Второй координатный механизм позволяет изменять угол между плоскостью матрицы и главной оптической осью. Изменение этого угла позволяет добиться резкости на всем изображении. Для грубой установки угла необходимо ослабить шайбу под лимбом, повернуть на желаемый угол и затянуть шайбу. Для точного выставления угла используется шайба над лимбом. Шайба соединена с поворотной частью через эксцентрик, что позволяет точно выставлять угол. Третья координатная ось дает возможность изменять расстояние между объективом и матрицей, варьируя тем эффективное увеличение оптической системы. Фактически изменение этого расстояния действует также как использование колец для объектива. При нулевой координате на лимбе расстояние от матрицы до объектива равно паспортному значению. Если матрицу отодвигать от объектива, то увеличение оптической системы будет увеличиваться. Тем самым данный координатный механизм позволяет получить произвольное увеличение оптической системы, не менее паспортного увеличения. При этом нужно понимать, что область расстояний от объекта до камеры, при котором объект будет находиться в резкости, изменяется. Это означает, что, отодвинув объект от матрицы, настроить резкость на бесконечно удаленный объект будет уже невозможно. Таким образом, необходимо было найти компромисс между увеличением оптической системы и диапазоном расстояний от камеры до плоскости измерений, при котором измеряемая область может находиться в резкости.

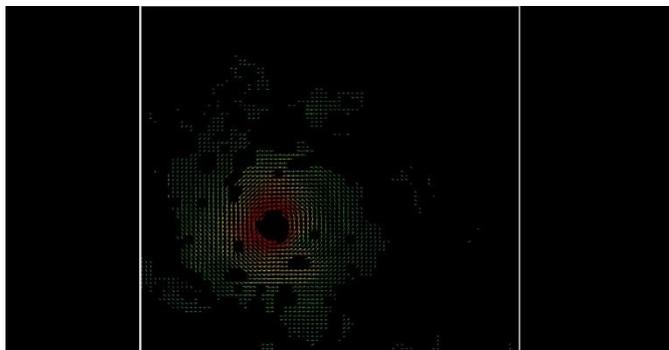


Рис. 2. Цифровая фотокамера и координатное устройство системы «ПОЛИС»

Синхронизирующий процессор. Синхронизирующий процессор предназначен для синхронизации работы лазера и камер, для отсчета временных интервалов и генерации синхроимпульсов через заданные промежутки времени. Процессор имеет восемь идентичных каналов отсчета временных интервалов; каждый канал имеет выход на передней панели блока. Также на передней панели имеется вход для обеспечения синхронизации по внешнему импульсу и сигнальные светодиоды. На задней панели имеется разъём RS232 для управления процессора от персонального компьютера, выключатель

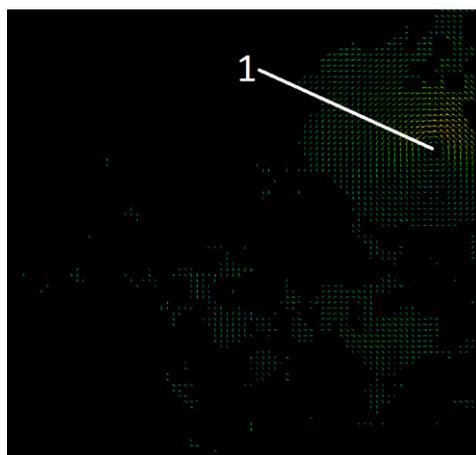
питания и разъем для присоединения сетевого кабеля. Управление блоком осуществляется от ПК через стандартный интерфейс RS323 (COM-порт).

Результаты. Результаты обработки измерений полей скоростей воздушных нестационарных вихрей на основе анемометрии по изображениям частиц приводятся в видеоролике 2.

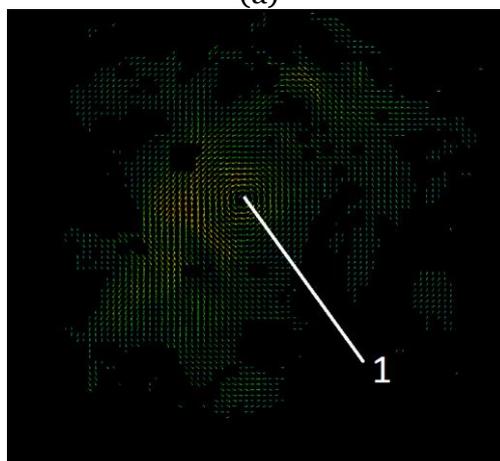


Видеоролик 2. Развитие полей мгновенных скоростей в поперечном сечении вихря

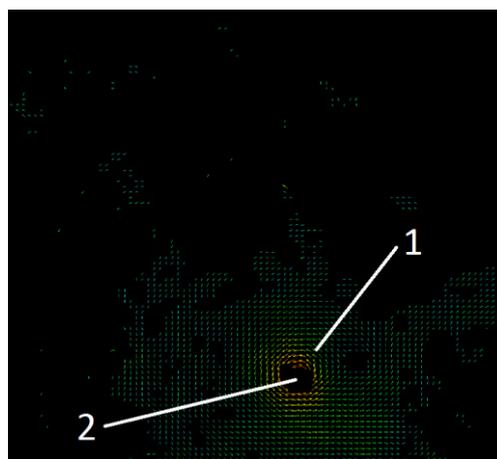
Полученные выборочные фотографии с зафиксированным воздушным вихрем в разные моменты времени обрабатывались с целью нахождения распределений скоростей в горизонтальной плоскости. Полученные в результате обработки поля скоростей в поперечном сечении модельного вихря приведены на рис. 3 и рис. 4.



(a)



(б)



(в)

Рис. 3. Мгновенные поля скоростей: а) $\tau = 3$ с, б) $\tau = 7$ с, в) $\tau = 22$ с.
Цифрами обозначены: 1 – нестационарный воздушный вихрь; 2 – сформированный «глаз» вихря.

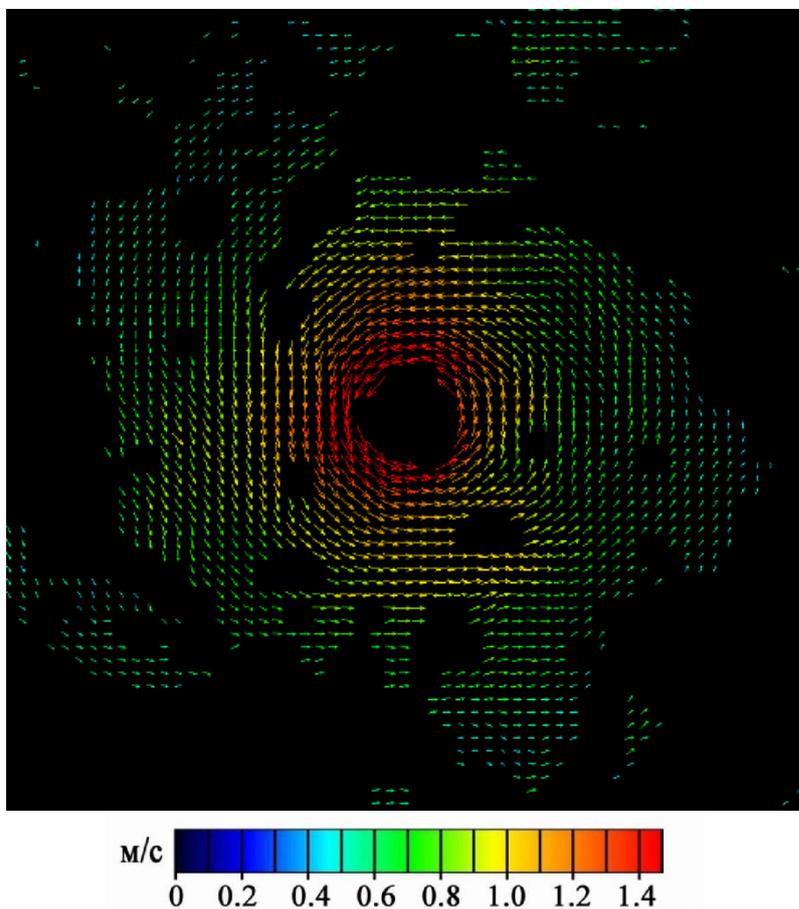


Рис. 4. Мгновенное поле скоростей в момент максимального развития нестационарного воздушного вихря ($\tau = 15$ с).

С целью более детального анализа распределений скоростей в поперечном сечении воронки вихря на рис. 4 приведено мгновенное поле скоростей в момент максимального развития вихревой структуры в увеличенном масштабе.

Полученный массив экспериментальной информации, касающейся полей скоростей генерируемых вихревых структур, позволил сделать вывод о близости данных распределений в воронке вихря к распределению скоростей в классическом вихре Рэнкина.

5. Заключение

Приводятся результаты визуализации свободных нестационарных вихрей с помощью прямой видеосъемки, а также векторные поля мгновенных скоростей в поперечном сечении вихря, полученные путем использования метода анемометрии по изображениям частиц (PIV-метод).

Разработанная методология визуализации и диагностики свободных нестационарных вихрей может быть использована при разработке и создании систем охлаждения электротехнических устройств киловольтного и мегаваттного диапазона.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.604.21.0178, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI60417X0178).

Список литературы

1. Wang P., McCluskey P., Bar-Cohen A. Two-Phase Liquid Cooling for Thermal Management of IGBT Power Electronic Module. *Journal of Electronic Packaging*, 2013, vol. 135, № 2, 021001.
2. Bar-Cohen A., Matin K., Narumanchi S. Nanothermal Interface Materials: Technology Review and Recent Results. *Journal of Electronic Packaging*, 2015, vol. 137, № 4, 040803.
3. Bar-Cohen A. Gen 3 “Embedded Cooling”: Key Enabler for Energy Efficient Data Centers. *IEEE Transactions on Component Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, vol. 7, № 8, p. 1206-1211.
4. Zeigarnik Y.A., Vasil`ev N.V., Druzhinin E.A. Kalmykov I.V., Kosoi A.S., Khodakov K.A. Prospects for Boiling of Subcooled Dielectric Liquids for Supercomputer Cooling. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, № 2, p. 58-60.
5. 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, p. 6567-6572.
6. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. *Tornado*. New York: Begell House, 2015.
7. Adrian R.J. Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1991, vol. 23, p. 261-304.
8. Adrian R.J. *Bibliography of Particle Velocimetry Using Imaging Methods: 1917-1995*. TSI Inc., Minnesota, 1996.
9. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry*. Springer, 2007.
10. Varaksin A.Yu. *Collisions in Particle-Laden Gas Flows*. New York: Begell House, 2013.
11. Скорнякова Н.М., Сычев Д.Г., Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э. Визуализация вихревых структур методом анемометрии по изображениям частиц. *Научная визуализация*, 2015, т. 7, № 3, с. 15-24.
12. Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М. Применение метода time-resolved tomographic PIV для исследования процессов формирования когерентных вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе. *Научная визуализация*, 2015, т. 7, № 3, с. 1-8.
13. Alekseenko S.V., Dulin V.M., Tokarev M.P., Markovich D.M. A Swirling Jet with Vortex Breakdown: Three-Dimensional Coherent Structures. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016, vol. 23, № 2, p. 301-304.
14. Shestakov M.V., Mullyadzhyanov R.I., Tokarev M.P., Markovich D.M. Modulation of Large-Scale Meandering and Three-Dimensional Flows in Turbulent Slot Jets. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2016, vol. 25, № 2, p. 159-165.
15. Alekseenko S.V., Abdurakipov S.S., Hrebtov M.Y., Tokarev M.P., Dulin V.M., Markovich D.M. Coherent Structures in the Near-Field of Swirling Turbulent Jets: A Tomographic PIV Study. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018, vol. 70, p. 363-379.

Visualization of whirlwind (non-stationary vortex) structures aimed to the improvement of cooling systems of electric power devices

A.Yu. Varaksin^{1,A}, K.K. Denshchikov^{2,B}, M.V. Protasov^{3,B}, M.E. Romash^{4,B}

^A Bauman Moscow State Technical University

^B Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-9256-1491, kdenshchikov@mail.ru

³ ORCID: 0000-0003-0711-9437, protasov_m@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-3524-078X, romash_61@mail.ru

Abstract

This paper concerns with the problems of cooling down of various high-voltage electric power devices of the megawatt range. When flowing around the current-carrying and other elements of these devices a formation of non-stationary vortices can take place. Therefore, a detection and visualization of vortex structures appearing at the coolant flowing through channels with the complicated geometry is an important task.

The generation of whirlwind structures (non-stationary vortices) was performed above this substrate surface (aluminum alloy sheet) by the unstable air stratification obtained by heating it up from below. We have used the mcm sized particles of magnesia deposited on the substrate surface to visualize the generated free non-stationary vortices.

The frame-by-frame view of recordings obtained by the direct video-registration at various thermal modes allowed performing of the qualitative analysis of the spatio-temporal structure of non-stationary vortices and obtaining a lot of their important integral parameters (visible height, diameter, lifetime, quantity of vortices, base motion velocity, etc.).

There had been considered physical basements of processing of flow patterns obtained by the PIV method with the use of the measurer of fields of velocities POLIS (Russian “ПОЛИС”, the instrument is developed by the S.S. Kutateladze Institute for Thermophysics of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk) in order to recover the fields of instantaneous velocities of vortex structures.

The results of the visualization of free non-stationary vortices obtained by the direct video filming and vector fields of instantaneous velocities, obtained by the PIV (Particle image velocimetry) method, have been presented.

The developed technique of visualization and diagnosis of free non-stationary vortices can be used for development of the state-of-the-art cooling systems of high-power electric devices.

Keywords: visualization, free non-stationary vortices, cooling down of electric power devices, PIV method, vector field of velocities.

References

1. Wang P., McCluskey P., Bar-Cohen A. Two-Phase Liquid Cooling for Thermal Management of IGBT Power Electronic Module. *Journal of Electronic Packaging*, 2013, vol. 135, № 2, 021001.
2. Bar-Cohen A., Matin K., Narumanchi S. Nanothermal Interface Materials: Technology Review and Recent Results. *Journal of Electronic Packaging*, 2015, vol. 137, № 4, 040803.

3. Bar-Cohen A. Gen 3 “Embedded Cooling”: Key Enabler for Energy Efficient Data Centers. *IEEE Transactions on Component Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, vol. 7, № 8, p. 1206-1211.
4. Zeigarnik Y.A., Vasil`ev N.V., Druzhinin E.A. Kalmykov I.V., Kosoi A.S., Khodakov K.A. Prospects for Boiling of Subcooled Dielectric Liquids for Supercomputer Cooling. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, № 2, p. 58-60.
5. 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, p. 6567-6572.
6. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. *Tornado*. New York: Begell House, 2015.
7. Adrian R.J. Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 1991, vol. 23, p. 261-304.
8. Adrian R.J. *Bibliography of Particle Velocimetry Using Imaging Methods: 1917-1995*. TSI Inc., Minnesota, 1996.
9. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry*. Springer, 2007.
10. Varaksin A.Yu. *Collisions in Particle-Laden Gas Flows*. New York: Begell House, 2013.
11. Skorniyakova N.M., Sychev D.G., Varaksin A.Yu., Romash M.E. Visualization of Vortex Structures by Particle Image Velocimetry. *Scientific Visualization*, 2015, vol. 7, № 3, p. 15-24.
12. Shestakov M.V., Tokarev M.P., Markovich D.M.. Application of Time-Resolved Tomographic PIV Technique for the Investigation of Processes Forming of Vortex Structure in Quasi Two-Dimensional Turbulent Jet. *Scientific Visualization*, 2015, vol. 7, № 3, p. 1-8.
13. Alekseenko S.V., Dulin V.M., Tokarev M.P., Markovich D.M. A Swirling Jet with Vortex Breakdown: Three-Dimensional Coherent Structures. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016, vol. 23, № 2, p. 301-304.
14. Shestakov M.V., Mullyadzhanov R.I., Tokarev M.P., Markovich D.M. Modulation of Large-Scale Meandering and Three-Dimensional Flows in Turbulent Slot Jets. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2016, vol. 25, № 2, p. 159-165.
15. Alekseenko S.V., Abdurakipov S.S., Hrebtov M.Y., Tokarev M.P., Dulin V.M., Markovich D.M. Coherent Structures in the Near-Field of Swirling Turbulent Jets: A Tomographic PIV Study. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018, vol. 70, p. 363-379.