

# Обработка визуальных экспериментальных PIV-данных при помощи генератора случайных синтетических частиц

А.А. Мочалов<sup>1,А,В</sup>, А.Ю. Вараксин<sup>2,А,В</sup>

<sup>А</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия

<sup>В</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Россия

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3078-1277, [artem.mochalov@yandex.ru](mailto:artem.mochalov@yandex.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8799-6378, [varaksin\\_a@mail.ru](mailto:varaksin_a@mail.ru)

## Аннотация

Исследование свободных нестационарных вихревых структур методом PIV требует поиска наиболее рационального подхода к обработке визуальных данных. В работе проведена оценка качественных и количественных характеристик полей скорости на основе генератора искусственных частиц-трассеров. Рассмотрен упрощенный случай плоского твердотельного поворота с заданной скоростью, как наиболее близкий к вихревому движению.

**Ключевые слова:** генератор искусственных частиц, PIV, векторные карты, счетная концентрация частиц.

## 1. Введение

В механике однофазных потоков используется целый ряд различных методов диагностики течений – от одноточечных контактных методов [1–3] до широкого класса бесконтактных [4–13]. Класс бесконтактных методов, прежде всего оптических, в свою очередь, подразделяется на одноточечные (например, LDA лазерный доплеровский анемометр [4–7]) и различные модификации «полевых» методов [8–14], в частности основанных на стробоскопической трассерной визуализации потоков. Стробоскопическая трассерная визуализация потоков позволяет регистрировать мгновенную картину течения. Указанное обстоятельство приобретает принципиальное значение, если речь идет о визуализации и диагностике нестационарных турбулентных течений [15–17] или потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры [18–22].

Для измерения кинематических параметров газовой среды с использованием оптических методов в нее вводят частицы-трассеры (обычно субмикрометровых и микрометровых размеров), массовая и объемная концентрация которых ничтожна. При соблюдении условия малости времени релаксации частиц по сравнению с характерными масштабами несущей среды мгновенные скорости частиц-трассеров будут практически равны скоростям газа [23].

Метод анемометрии по изображениям частиц (АИЧ) основан на определении смещений добавленных в поток частиц-трассеров, подсвеченных лазерным «ножом». PIV (Particle Image Velocimetry) – международное общепринятое название метода. Источником света, как правило, является импульсный лазер. Во время проведения эксперимента кросскорреляционная камера, по возможности, устанавливается ортогонально лазерному «ножу» и реализует два изображения через малый промежуток времени для последующего определения поля скорости. Для

аэродинамических задач в качестве частиц-трассеров наиболее часто применяются туман или микрокапли глицерина.

В данной работе рассматривается обработка экспериментальных снимков на основе стандартного кросскорреляционного алгоритма. Идея алгоритма заключается в следующем. Измерительная область разбивается на некоторое количество элементарных ячеек, в которых рассчитывается среднее смещение изображений частиц-трассеров [24]. Параметр плотности изображений частиц ( $N_i$ ) на экспериментальных кадрах имеет важное значение при обработке данных алгоритмами PIV, так как влияет на точность восстанавливаемых мгновенных полей скорости. Оптимальная плотность изображений частиц в расчетной ячейке может существенно уменьшить погрешность измерений, так как большее количество пар частиц – трассеров увеличивает четкость корреляционного пика [11]. В экспериментальных изображениях нестационарной вихревой структуры, значение плотности образов частиц может изменяться в широком диапазоне.

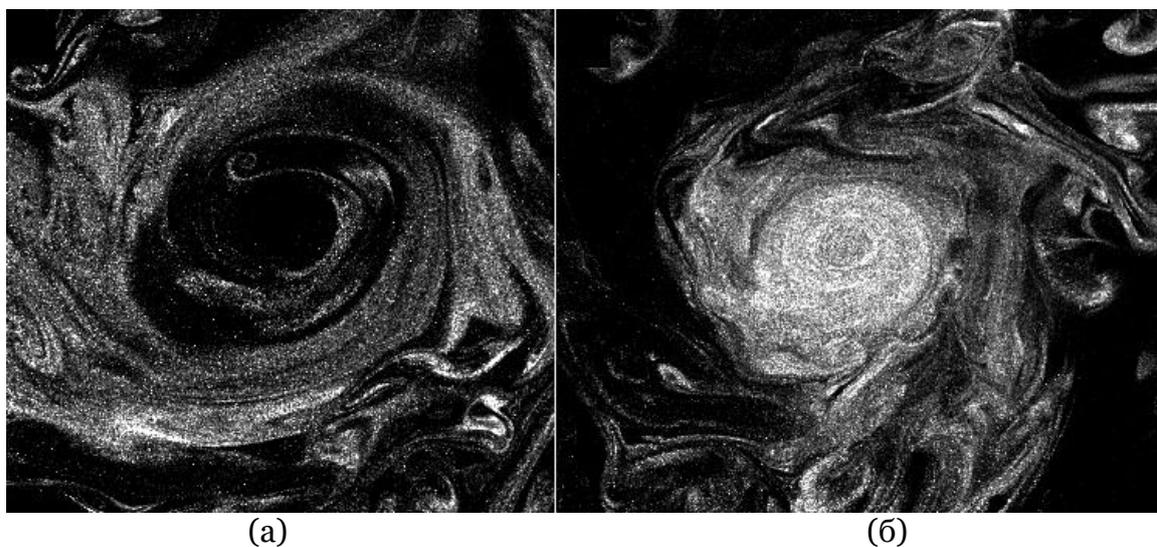


Рис. 1 Пример реального распределения концентрации частиц в ядре вихря

На примере рисунка 1 можно выделить два характерных случая для поперечного сечения нестационарной вихревой структуры: (а) практически полное отсутствие частиц ( $N_i \sim 0$ ) и (б) повышенная концентрация частиц ( $N_i > 10$ ). Далее, на основе генератора искусственных частиц, рассматриваются подходы к обработке экспериментальных кадров.

## 2. Генератор искусственных частиц-трассеров

Оценить возможный вклад различной плотности изображений частиц-трассеров в определение векторных карт можно при помощи программного генератора искусственных частиц [25]. Данное программное обеспечение генерирует изображение с черным фоном заданного разрешения, на которое в последствии случайным образом наносятся группы пикселей белого цвета с целью имитации реальных частиц в потоке. В качестве задаваемых вводных данных для частиц, можно выделить следующие параметры: характерный диаметр и отклонение от его среднего значения, счетное количество искусственных частиц в кадре, скорость смещения и др. Основная идея применения данного ПО, заключается в получении изображений частиц с заданным перемещением для дальнейшей обработки при помощи алгоритмов PIV.

Для поиска рациональных параметров обработки экспериментальных изображений вихревых структур были смоделированы различные случаи засева потока частицами-трассерами. На рисунке 2 показан коллаж изображений с различным счетным количеством искусственных частиц. В качестве трассеров заданы частицы с



### 3. Построение векторных карт для закрученного течения

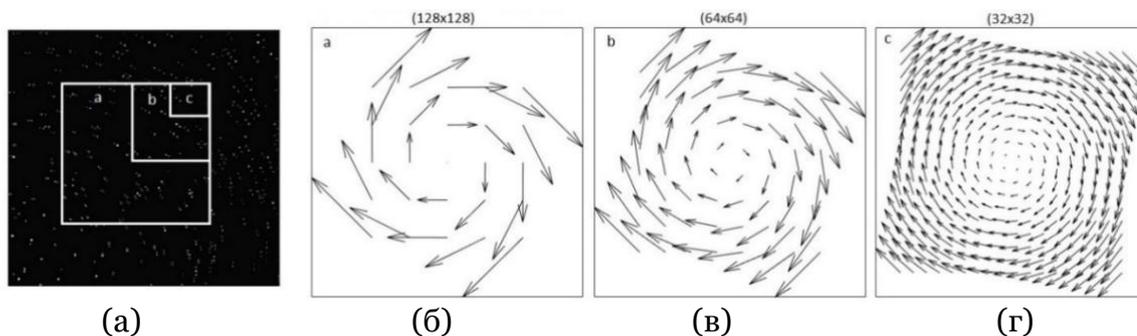


Рис. 4 Количество заданных векторов при различном размере расчетной области (искусственный кадр 1000x1000 пикселей): (а) – искусственный кадр; (б) – 128x128 пикселей; (в) – 64x64 пикселей; (г) – 32x32 пикселей

На рисунке 5 показаны выборочные результаты применения PIV-алгоритма к искусственным изображениям с фиксированной концентрацией частиц. Для наглядности приведены примеры малой концентрации и показан эффект потери векторов.

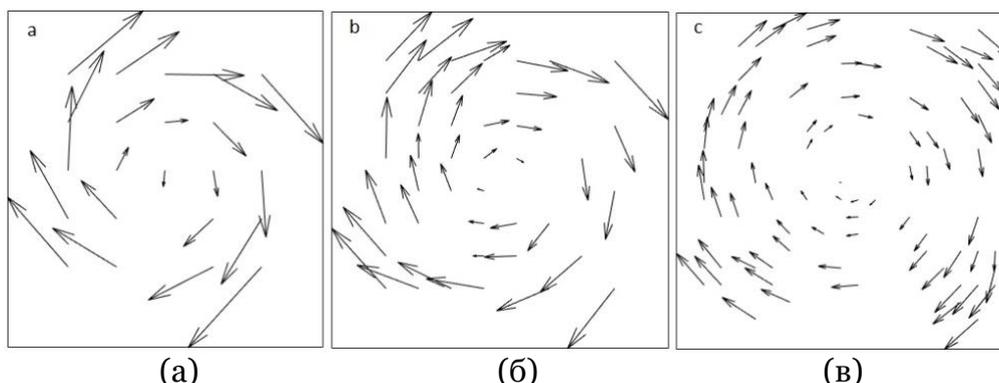


Рис. 5 Применение кросскорреляционного алгоритма обработки для изображений с малой концентрацией частиц: (а) – 128x128 пикселей; (б) – 64x64 пикселей; (в) – 32x32 пикселей

Сводный график количества найденных векторов в зависимости от концентрации частиц в кадре показан на рисунке 6.

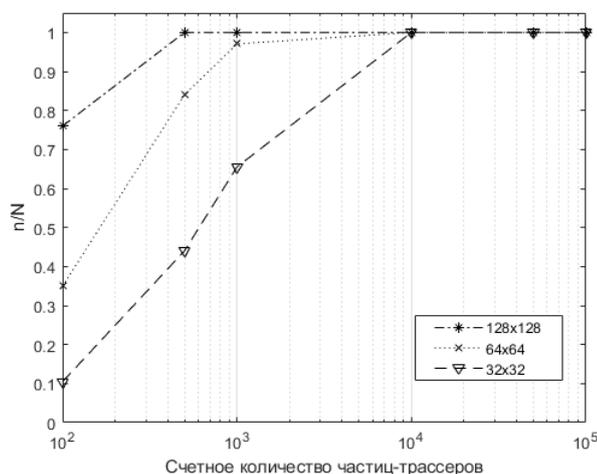


Рис. 6 Количество определенных векторов

Из графика видно, что для малого засева частицам-трассерами наиболее выгодным является дробление на крупные расчетные области (например 128x128 пикселей), но при этом теряется пространственное разрешение PIV метода. При уменьшении размера расчетной области и сохранении малой концентрации частиц, потеря векторов может достигать порядка 90% и 65% для областей 32x32 и 64x64 пикселей соответственно. Наилучшим исходным количеством частиц для определения векторных карт (при условии сохранения хорошего пространственного разрешения) являются счетные концентрации частиц от  $10^4$  (для кадра 1000x1000 пикселей).

Помимо всего прочего, счетная концентрация частиц в кадре влияет на качество найденных векторов. В работе рассматривается малый динамический диапазон, соответствующей задаче изучения нестационарных концентрированных вихрей с невысокими скоростями (до 10 м/с). Оценка отклонения найденных векторов от исходных при помощи PIV-метода, для различной концентрации частиц показана на графике (рис. 7).

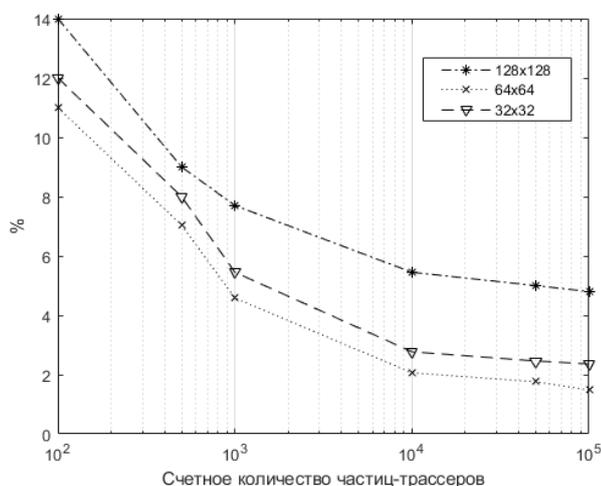
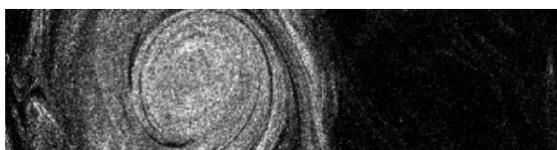


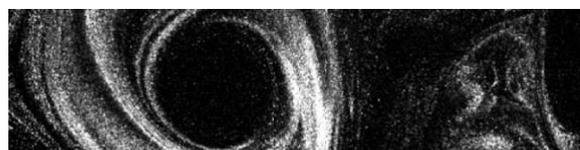
Рис. 7 Отклонение значений найденных векторов от исходных значений

Для рассматриваемых задач, следует учитывать кривизну линий тока и масштабы расчетных областей. Стандартный кросскорреляционный PIV алгоритм следует из предположений о линейном смещении частиц, отклонение значений найденных векторов от реальных скоростей потока, будет большим для случаев существенно закрученных потоков. В контексте рассматриваемой задачи, следует учитывать кривизну линий тока и масштабы расчетных областей. При оптимальной счетной концентрации частиц ( $10^4$ ), размеру расчетной ячейки и хорошем пространственном разрешении отклонение может достигать 2% и менее. Стоит отметить, что в диапазоне концентраций частиц  $10^4 - 10^5$  качество определенных векторов практически не меняется.

В качестве примера, приведены реальные фрагменты изображения вихревой структуры с различной счетной концентрацией частиц трассеров (рис. 8а, 8б). Ниже приведены поля скорости с регулярным дроблением на расчетные области 32x32 пикселя. На рис. 8 (в) показан случай потери векторов в силу недостаточного засева, а на рис. 8 (г) векторная карта дополнена векторами при помощи интерполяции данных.



(а)



(б)

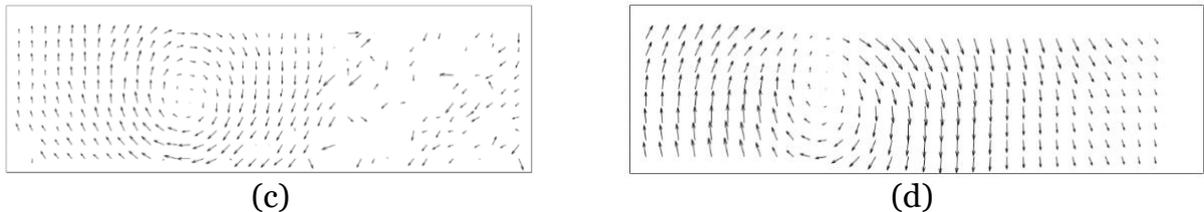


Рис. 8 Применение фиксированной расчетной области 32x32 пикселя; изображения относятся к одной серии кадров для разного момента времени: (а), (б) – изображения вихревой структуры; (в), (г) – поля скоростей

Следует отметить, что для одной вихревой структуры в разные моменты времени существенно меняется концентрация частиц, например в области вихревой воронки, что ведет к потере векторов. Применение линейной интерполяции, в свою очередь, позволяет дополнить векторную карту некоторым количеством векторов для оценки таких параметров как циркуляция и центр вращения.

## 4. Заключение

В работе показаны различные случаи обработки экспериментальных снимков при условии сохранения разрешения снимков. Приведены оценки погрешности измерений и количества потерянных векторов при различном дроблении на расчетные области и разной счетной концентрацией частиц-трассеров. Представлены результаты определения векторных карт реальных вихревых структур. Работа может быть интересна для задач обработки экспериментальных снимков закрученных потоков с переменной концентрацией частиц трассеров. Применение генератора искусственных частиц, на взгляд авторов, помогает облегчить задачу определения размера расчетной ячейки с целью извлечения максимума информации об объекте исследования в условиях сложного засева частицами трассерами в условиях реального эксперимента.

## Список литературы

1. Bradshaw P. Turbulence. Springer – Verlag, Berlin, 1976. 338 p.
2. Ярин Л.П., Генкин А.Л., Кукек В.И. Термоанемометрия газовых потоков. Л.: Машиностроение, 1983. 198 с.
3. Bruun H.H. Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis. Oxford: University Press, 1995. 507 p.
4. Durst F., Melling A., Whitelaw J.H. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry. London: Academic Press, 1976.
5. Дюррани Т., Грейтид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях. М.: Энергия, 1980. 336 с.
6. Somerscales E.F.C. Laser Doppler Velocimeter. In Methods of Experimental Physics (ed. by Emrich R.J.). London: Academic Press, 1981. V.18 (fluid dynamics, part A). P. 93-240.
7. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
8. Adrian R.J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Ann. Rev. Fluid Mech, 1991, vol. 23, p. 261-304.
9. Adrian R.J. Bibliography of Particle Velocimetry Using Imaging Methods: 1917-1995. TSI Inc., Minnesota, 1996.
10. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
11. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Springer, 2007.
12. Westerweel J. Digital Particle Image Velocimetry – Theory and Application / Delft: Delft University Press, 1993. 235 p.

13. Westerweel J. Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, vol. 8, p. 1379–1392.
14. Bilsky A.V., Gobyzov O.A., Markovich D.M. Evolution and Recent Trends of Particle Image Velocimetry for an Aerodynamic Experiment (Review). *Thermophysics and Aeromechanics*, 2020, vol. 27, p. 1-22.
15. Varaksin A.Yu. Collision of Particles and Droplets in Turbulent Two-Phase Flows. *High Temperature*, 2019, vol. 57, p. 555–572.
16. Varaksin A.Yu. Two-Phase Boundary Layer of Gas with Solid Particles. *High Temperature*, 2020, vol. 58, p. 716–732.
17. Okulov V.L., Naumov I.V., Kabardin I.K., Litvinov I.V., Markovich D.M., Mikkelsen R.F., Sorensen J.N., Alekseenko S.V., Wood D.H. Experiments on Line Arrays of Horizontal-Axis Hydroturbines. *Renewable Energy*, 2020, vol. 163, p. 15-21.
18. Dulin V.M., Lobasov A.S., Chikishev L.M., Markovich D.M., Hanjalic K. On Impact of Helical Structures on Stabilization of Swirling Flames with Vortex Breakdown. *Flow Turbulence and Combustion*, 2019, vol. 103, p. 887-911.
19. Lobasov A.S., Alekseenko S.V., Markovich D.M., Dulin V.M. Mass and Momentum Transport in the Near Field of Swirling Turbulent Jets. Effect of Swirl Rate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, vol. 83, paper 108539.
20. Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M., Markovich D.M. On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2020, vol. 56, p. 131-136.
21. Varaksin A.Yu., Mochalov A.A. A Double Screw Spiral as a Possible Mechanism of Wall-Free Nonstationary Air Vortex Generation. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, p. 301–303.
22. Varaksin A.Yu., Denshchikov K.K., Protasov M.V., Romash M.E. Visualization of Whirlwind (Non-Stationary Vortex) Structures Aimed to the Improvement of Cooling Systems of Electric Power Devices, *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, p. 74–83.
23. Varaksin A.Yu. Two-Phase Flows with Solid Particles, Droplets, and Bubbles: Problems and Research Results (Review). *High Temperature*, 2020, vol.58, p. 595–614.
24. Raffel M., Leidl B., Kompenhaus J. Data validation for particle image velocimetry. *Laser Techniques and Application in Fluid Mechanics*, Springer – Verlag, 1993, pp. 210 – 216
25. Thielicke W., Stamhuis E.J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2014, vol. 2, p.e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>

# Processing of Visual Experimental PIV-Data Using a Random Synthetic Particle Generator

A.A. Mochalov<sup>1,A,B</sup>, A. Yu. Varaksin<sup>2,A,B</sup>

<sup>A</sup> Moscow Bauman State Technical University, Russia

<sup>B</sup> Joint Institute for High Temperature, Russia

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3078-1277, [artem.mochalov@yandex.ru](mailto:artem.mochalov@yandex.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8799-6378, [varaksin\\_a@mail.ru](mailto:varaksin_a@mail.ru)

## **Abstract**

The study of free non-stationary vortex structures by the PIV method requires the search for the most rational approach to visual data processing. The paper evaluates the qualitative and quantitative characteristics of the velocity fields based on the generator of random synthetic particles. The simplified case of a solid-state rotation with a given velocity is considered as the closest to the vortex motion.

**Keywords:** generator of random synthetic particles, PIV, vector maps, numerical particle concentration.

## **References**

1. Bradshaw P. Turbulence. Springer – Verlag, Berlin, 1976. 338 p.
2. Yarin L.P., Genkin A.L., Kukes V.I. Termoanometriya gazovyh potokov. L.: Mashinostroenie, 1983. 198 s.
3. Bruun H.H. Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis. Oxford: University Press, 1995. 507 p.
4. Durst F., Melling A., Whitelaw J.H. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry. London: Academic Press, 1976.
5. Durrani T., Greated C.A. Laser Systems in Flow Measurement. Springer, USA, 1977. 289 p.
6. Somerscales E.F.C. Laser Doppler Velocimeter. In Methods of Experimental Physics (ed. by Emrich R.J.). London: Academic Press, 1981. V.18 (fluid dynamics, part A). P. 93-240.
7. Dubnishchev Yu.N., Rinkevichyus B.S. Metody lazernoj doplerovskoj anemometrii. M.: Nauka, 1982. 303 s.
8. Adrian R.J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Ann. Rev. Fluid Mech, 1991, vol. 23, p. 261-304.
9. Adrian R.J. Bibliography of Particle Velocimetry Using Imaging Methods: 1917-1995. TSI Inc., Minnesota, 1996.
10. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
11. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Springer, 2007.
12. Westerweel J. Digital Particle Image Velocimetry – Theory and Application / Delft: Delft University Press, 1993. 235 p.
13. Westerweel J. Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry. Meas. Sci. Technol, 1997, vol. 8, p. 1379–1392.
14. Bilsky A.V., Gobyzov O.A., Markovich D.M. Evolution and Recent Trends of Particle Image Velocimetry for an Aerodynamic Experiment (Review). Thermophysics and Aeromechanics, 2020, vol. 27, p. 1-22.

15. Varaksin A.Yu. Collision of Particles and Droplets in Turbulent Two-Phase Flows. *High Temperature*, 2019, vol. 57, p. 555–572.
16. Varaksin A.Yu. Two-Phase Boundary Layer of Gas with Solid Particles. *High Temperature*, 2020, vol. 58, p. 716–732.
17. Okulov V.L., Naumov I.V., Kabardin I.K., Litvinov I.V., Markovich D.M., Mikkelsen R.F., Sorensen J.N., Alekseenko S.V., Wood D.H. Experiments on Line Arrays of Horizontal-Axis Hydroturbines. *Renewable Energy*, 2020, vol. 163, p. 15-21.
18. Dulin V.M., Lobasov A.S., Chikishev L.M., Markovich D.M., Hanjalic K. On Impact of Helical Structures on Stabilization of Swirling Flames with Vortex Breakdown. *Flow Turbulence and Combustion*, 2019, vol. 103, p. 887-911.
19. Lobasov A.S., Alekseenko S.V., Markovich D.M., Dulin V.M. Mass and Momentum Transport in the Near Field of Swirling Turbulent Jets. Effect of Swirl Rate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, vol. 83, paper 108539.
20. Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M., Markovich D.M. On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2020, vol. 56, p. 131-136.
21. Varaksin A.Yu., Mochalov A.A. A Double Screw Spiral as a Possible Mechanism of Wall-Free Nonstationary Air Vortex Generation. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, p. 301–303.
22. Varaksin A.Yu., Denshchikov K.K., Protasov M.V., Romash M.E. Visualization of Whirlwind (Non-Stationary Vortex) Structures Aimed to the Improvement of Cooling Systems of Electric Power Devices, *Scientific Visualization*, 2020, vol. 12, p. 74–83.
23. Varaksin A.Yu. Two-Phase Flows with Solid Particles, Droplets, and Bubbles: Problems and Research Results (Review). *High Temperature*, 2020, vol.58, p. 595–614.
24. Raffel M., Leidl B., Kompenhaus J. Data validation for particle image velocimetry. *Laser Techniques and Application in Fluid Mechanics*, Springer – Verlag, 1993, pp. 210 – 216
25. Thielicke W., Stamhuis E.J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2014, vol. 2, p.e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>